



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



## **Negociação Bilateral em Mercados de Energia Eléctrica Multi-Agente com Participação Activa dos Consumidores**

**CRISTINA ILCO**

(Licenciada em Engenharia Eléctrica e Electrónica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa (ISEL)  
Professor Fernando Jorge Ferreira Lopes (LNEG)

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares (ISEL)

Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa (ISEL)  
Professor Fernando Jorge Ferreira Lopes (LNEG)  
Professor Paulo Manuel Trigo Cândido da Silva (ISEL)

**Novembro de 2012**



*"Ao meu pai, Alexandru Ilco, e à minha mãe, Sofia Ilco,  
pelo seu apoio e encorajamento."*





# Agradecimentos

Em primeiro lugar começo por agradecer ao meu professor e orientador, Prof. Doutor Jorge de Sousa, e ao meu co-orientador, Prof. Doutor Fernando Lopes, pela disponibilidade, pela preciosa ajuda na definição do objecto de estudo, esclarecimento e sugestões dadas para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também pelo todo apoio, colaboração e valiosos contributos científicos que me deram ao decorrer do período de realização da dissertação.

Ao ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa) agradeço a oportunidade de realizar este trabalho.

Ao LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) por me terem recebido e disponibilizado as instalações da UMOSE (Unidade de Modulação e Optimização de Sistemas Energéticos).

À minha família, em particular, aos meus pais, Alexandru Ilco e Sofia Ilco, e ao meu irmão, pela força e compreensão, pelos diversos sacrifícios suportados e pelo constante encorajamento.

Aos meus amigos, Maria João, Marco, Fábio, Samuel e Zélia, pela colaboração, amizade e espírito de entreaajuda. Agradeço também ao Hugo Lopes, pelo apoio e longas conversas que ajudaram à realização deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado, pelos momentos de entusiasmo partilhados em conjunto.

E a todas as outras pessoas que de forma directa ou indirecta contribuíram para o sucesso desta dissertação.



# Resumo

Nos últimos anos, o sector eléctrico tem sofrido profundas alterações decorrentes do processo de reestruturação. Como consequência, surgiram diferentes estruturas de mercado, tais como em bolsa, contratos bilaterais e mistos, tendo como objectivo o aumento da competitividade. Nos mercados competitivos, os consumidores de electricidade podem escolher livremente os seus fornecedores de energia, em função de possíveis vantagens económicas e da qualidade do serviço. A comercialização de electricidade pode ser realizada em mercados organizados ou através de contratação bilateral entre comercializadores e consumidores.

Actualmente, existem várias ferramentas de simulação baseadas em técnicas multi-agente que permitem modelar, parcialmente ou na totalidade, os mercados de electricidade, possibilitando simulações de negociação de preços e volumes através de contratos bilaterais, transacções em bolsas de energia, etc. No entanto, estas ferramentas apresentam algumas limitações devido à complexidade dos sistemas eléctricos.

Neste contexto, esta dissertação tem como principal objectivo desenvolver um simulador de contratos bilaterais em mercados de energia eléctrica, baseado na tecnologia multi-agente. O simulador inclui dois tipos de entidades: retalhistas e consumidores de electricidade com diferentes perfis de carga. Além disso, é composto por várias estratégias de negociação, que têm como objectivo maximizar o benefício dos agentes retalhistas e minimizar o custo dos consumidores finais de electricidade. Uma das estratégias, referente ao consumidor, é direccionada para a eficiência no consumo, sendo baseada na conhecida técnica de Participação Activa dos Consumidores (ou *Demand Response*).

O teste do simulador foi efectuado através da resolução de dois casos práticos, baseados em dados do MIBEL. De forma sucinta, os resultados obtidos com as estratégias permitem concluir que os intervenientes no mercado apresentam um comportamento esperado na gestão de preços e volumes de energia, constatando-se que a ferramenta desenvolvida constitui um auxiliar importante à tomada de decisão inerente à negociação bilateral em mercados de electricidade.

**Palavras-chave:** Mercados de energia eléctrica, sistemas multi-agente, contratos bilaterais, participação activa dos consumidores, estratégias de negociação, simulação.



# Abstract

Over the past years, the electricity sector has experienced major changes resulting from the restructuring process. As a consequence, different market structures have emerged, including pool, bilateral contracts and hybrid markets, leading to an increased competitiveness in the sector. In competitive markets, consumers can freely choose their energy suppliers. The electricity trade can be done in organized markets or using bilateral contracts between consumers and suppliers.

Currently, there are several simulation tools based on multi-agent techniques that allow modeling, partially or globally, the electricity markets. The existing tools allow to simulate negotiation prices and volumes through bilateral contracts, transactions in pool markets, etc. However, these tools have some limitations, mainly due to the complexity of the electric systems.

In this context, this thesis has the major goal of developing a simulator for bilateral contracts in electricity markets making use of agent technology. The simulator includes two types of entities: retailers and electricity consumers with different load profiles. Furthermore, it is composed of various negotiation strategies aiming to maximize the benefit of retailers' agents and to minimize the cost of consumers. One of these strategies, related to the consumer, is directed to consumption efficiency and is based on Demand Response techniques.

The simulator was applied to two practical cases based on data from MIBEL. The simulation results, obtained with the strategies, support the belief that the behavior of market participants in management of energy prices and volumes is as expected. The results also confirm the belief that the tool can be important in supporting decisions during the negotiation of bilateral contracts in electricity markets.

**Keywords:** Electricity markets, multi-agent systems, bilateral contracts, demand response, negotiation strategies, simulation.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Aspectos Gerais e Enquadramento . . . . .	2
1.2	Motivações . . . . .	5
1.3	Objectivos . . . . .	6
1.4	Estrutura da dissertação . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Mercados de Energia Eléctrica</b>	<b>9</b>
2.1	Evolução do Mercado de Energia Eléctrica . . . . .	10
2.1.1	Liberalização do Sector Eléctrico em Portugal . . . . .	11
2.2	Modelos de Mercado . . . . .	14
2.2.1	Modelo em Bolsa ou <i>pool</i> . . . . .	14
2.2.2	Modelo de Contratos Bilaterais . . . . .	15
2.2.3	Modelo Misto . . . . .	16
2.3	Contratos Bilaterais Físicos . . . . .	16
2.4	Breve Descrição do Mercado Ibérico de Electricidade . . . . .	17
2.5	Participação Activa dos Consumidores em Ambiente de Mercado . . . . .	20
2.5.1	Definição da PAC . . . . .	22
2.5.2	Importância da PAC . . . . .	22
2.5.3	Benefícios da PAC . . . . .	23
2.5.4	Tipos de Programas de PAC . . . . .	24
2.6	Conclusão . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Sistemas Multi-Agente para Mercados de Energia</b>	<b>29</b>
3.1	Introdução . . . . .	30
3.2	Sistemas Multi-Agente . . . . .	30
3.2.1	Agentes Autónomos . . . . .	31
3.2.1.1	Arquitecturas Deliberativas . . . . .	34
3.2.1.2	Arquitecturas Reactivas . . . . .	34
3.2.1.3	Arquitecturas Híbridas . . . . .	35
3.2.1.4	Arquitecturas BDI . . . . .	36
3.2.2	Negociação entre Agentes Autónomos . . . . .	36

3.2.3	Plataformas Computacionais existentes para SMA . . . . .	39
3.2.3.1	JADE . . . . .	39
3.2.3.2	OAA . . . . .	41
3.2.3.3	REPAST . . . . .	41
3.3	Mercado de Energia Multi-Agente . . . . .	42
3.3.1	Entidades do Mercado de Energia Eléctrica . . . . .	43
3.3.2	O Problema de Projecto . . . . .	46
3.3.3	O Problema de Coordenação . . . . .	48
3.3.4	Ferramentas de Simulação Multi-Agente de Mercados de Energia Eléctrica . . . . .	48
3.3.4.1	MASCEM . . . . .	49
3.3.4.2	EMCAS . . . . .	50
3.3.4.3	SEPIA . . . . .	50
3.3.4.4	SCBE e SMEE . . . . .	51
3.3.4.5	Comparação entre as Ferramentas de Simulação Multi-Agente de Mercados de Energia Eléctrica . . . . .	52
3.4	Conclusão . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Negociação de Contratos Bilaterais com Participação Activa dos Consumidores</b>	<b>55</b>
4.1	Introdução . . . . .	56
4.2	Negociação de Contratos Bilaterais . . . . .	57
4.2.1	Planeamento e Preparação da Negociação . . . . .	58
4.2.2	Protocolo de Ofertas Alternadas . . . . .	60
4.2.2.1	Descrição por Diagrama de Estados . . . . .	61
4.2.2.2	Descrição segundo o modelo da FIPA . . . . .	63
4.3	Estratégias de Negociação . . . . .	65
4.3.1	Estratégia do Agente Retalhista: Gestão de Preço . . . . .	68
4.3.2	Estratégia do Consumidor: Gestão de Volume . . . . .	69
4.4	Contratos Bilaterais em Portugal . . . . .	72
4.5	Conclusão . . . . .	75
<b>5</b>	<b>O Simulador SIMEPAC e Estudo de Casos Práticos</b>	<b>77</b>
5.1	Introdução . . . . .	78
5.2	SIMEPAC: Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores . . . . .	78
5.2.1	<i>Interface</i> Gráfica . . . . .	79
5.2.2	Descrição do Algoritmo . . . . .	85
5.2.2.1	Formulação das Propostas dos Agentes . . . . .	85
5.2.2.2	Preferências dos agentes . . . . .	90



5.3	Tarifas de Energia . . . . .	92
5.4	Estudo de Casos Práticos . . . . .	93
5.4.1	Preços e Volumes de Referência . . . . .	93
5.4.1.1	Preços de Referência . . . . .	93
5.4.1.2	Volumes de Referência . . . . .	94
5.4.2	Agente Retalhista . . . . .	95
5.4.2.1	Preços iniciais . . . . .	95
5.4.3	Consumidor final . . . . .	95
5.4.3.1	Preços e Volumes iniciais . . . . .	96
5.4.4	Resultados . . . . .	97
5.4.4.1	Caso de Estudo 1 . . . . .	98
5.4.4.2	Caso de Estudo 2 . . . . .	103
5.5	Conclusões . . . . .	107
<b>6</b>	<b>Conclusões e Desenvolvimento Futuro</b>	<b>109</b>
6.1	Síntese dos Resultados . . . . .	110
6.2	Desenvolvimento Futuro . . . . .	112
	<b>Referências</b>	<b>113</b>
	<b>Anexo A Preços horários do mercado diário fornecidos pelo OMIE</b>	<b>A-1</b>
	<b>Anexo B Perfis de carga fornecidos pelo NYSEG</b>	<b>B-1</b>
	<b>Anexo C Resultados do Simulador SIMEPAC - Critério Distância Vectorial</b>	<b>C-1</b>



# Lista de Figuras

2.1	Modelo em monopólio verticalmente integrado e modelo liberalizado. . . . .	11
2.2	Calendarização da abertura do mercado português de energia eléctrica. . . . .	12
2.3	Organização do sistema eléctrico em Portugal. . . . .	13
2.4	Fixação do preço de mercado para um período de tempo. . . . .	15
2.5	A integração dos programas PAC na operação e planeamento de sistemas de energia. . . . .	26
3.1	Um agente a actuar sobre o ambiente. . . . .	32
3.2	Estrutura de uma arquitectura deliberativa. . . . .	34
3.3	Estrutura de uma arquitectura reactiva. . . . .	35
3.4	Estrutura de uma arquitectura híbrida. . . . .	35
3.5	Esquema genérico do processo negocial. . . . .	37
3.6	Sistema eléctrico e a competitividade do mercado de energia. . . . .	44
3.7	Mercado de energia multi-agente. . . . .	47
4.1	Diagrama de estados do protocolo de ofertas alternadas. . . . .	62
4.2	Diagrama do protocolo de ofertas alternadas segundo o modelo da FIPA. . . . .	64
4.3	Esquema simplificado da aplicação da estratégia de “Gestão de Preço”. . . . .	69
4.4	Esquema simplificado da aplicação da estratégia de “Gestão de Volume”. . . . .	72
4.5	Contratação bilateral em Portugal. . . . .	73
4.6	Estrutura de mercado – oferta. . . . .	73
4.7	Estrutura de mercado – procura. . . . .	74
5.1	Janelas de informação de cada agente. . . . .	80
5.2	Janela principal do simulador. . . . .	81
5.3	Janelas referentes ao agente vendedor e comprador. . . . .	82
5.4	Janelas referentes ao perfil de carga do agente comprador e aos preços iniciais do agente vendedor. . . . .	83
5.5	Janelas referentes a pré-negociação do agente comprador. . . . .	84
5.6	Janelas referentes a pré-negociação do agente comprador, definição do prazo da negociação. . . . .	84

5.7	Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério MB (Caso de estudo 1.) . . . . .	99
5.8	Evolução do processo negocial (Caso de estudo 1). . . . .	100
5.9	Variação dos preços e volumes de energia dos agentes (Caso de estudo 1.)	101
5.10	Avaliação da proposta aceite pelo agente comprador (Caso de estudo 1).	102
5.11	Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério MB (Caso de estudo 2). . . . .	103
5.12	Evolução do processo negocial (Caso de estudo 2). . . . .	104
5.13	Variação dos preços e volumes de energia dos agentes (Caso de estudo 2).	105
5.14	Avaliação da proposta aceite pelo agente comprador (Caso de estudo 2).	107
C.1	Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério DV (Caso de estudo 1). . . . .	C-2
C.2	Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério DV (Caso de estudo 2). . . . .	C-3

# Lista de Tabelas

3.1	Características das ferramentas multi-agente de MEE analisados. . . . .	53
5.1	Preços de referência da energia. . . . .	94
5.2	Volumes de referência de energia. . . . .	95
5.3	Resumo dos valores iniciais do agente retalhista (Caso de Estudo 1). . .	96
5.4	Resumo dos valores iniciais do agente retalhista (Caso de Estudo 2). . .	96
5.5	Resumo dos valores iniciais do consumidor de energia (Caso de Estudo 1). .	97
5.6	Resumo dos valores iniciais do consumidor de energia (Caso de Estudo 2). .	97
5.7	Parâmetros referentes aos casos de estudo. . . . .	98
5.8	Quantidades transferidas por ordem de importância (Caso de estudo 1). .	101
5.9	Valores de custo das propostas enviadas e recebidas pelo agente comprador (Caso de estudo 1). . . . .	102
5.10	Quantidades transferidas por ordem de importância (Caso de estudo 2). .	106
5.11	Valores de custo das propostas enviadas e recebidas pelo agente comprador (Caso de estudo 2). . . . .	106
A.1	Preços horários do mercado diário no sistema português para o dia 05/04/2012.A-2	
A.2	Preços horários do mercado diário no sistema português para o dia 06/06/2012.A-3	
B.1	Perfil de carga para um consumidor do tipo comercial. . . . .	B-3
B.2	Perfil de carga para um consumidor do tipo industrial. . . . .	B-5



# Lista de Acrónimos

<b>ACC</b>	<i>Agent Communication Channel</i>
<b>AMS</b>	<i>Agent Management System</i>
<b>AT</b>	Alta Tensão
<b>BT</b>	Baixa Tensão
<b>BTE</b>	Baixa Tensão Especial
<b>BTN</b>	Baixa Tensão Nominal
<b>CPP</b>	<i>Critical Peak Pricing</i>
<b>CPPE</b>	Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade (EDP Produção)
<b>DF</b>	<i>Directory Facilitator</i>
<b>DR</b>	<i>Demand Response</i>
<b>DV</b>	Critério Distância Vectorial
<b>ED-CPP</b>	<i>Extreme Day CPP</i>
<b>EDP</b>	Energias de Portugal, S. A.
<b>EDPP</b>	<i>Extreme Day Pricing Programs</i>
<b>EMCAS</b>	<i>Electric Market Complex Adapted System</i>
<b>ERSE</b>	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>FIPA</b>	<i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>
<b>IBP</b>	<i>Incentive - Based Programs</i>
<b>ICL</b>	<i>InterAgent Communication Language</i>
<b>JADE</b>	<i>Java Agent DEvelopment Framework</i>

<b>MAT</b>	Muito Alta Tensão
<b>MASCEM</b>	<i>Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets</i>
<b>MB</b>	Critério Máximo Benefício
<b>MEE</b>	Mercado de Energia Eléctrica
<b>MIBEL</b>	Mercado Ibérico de Electricidade
<b>MT</b>	Média Tensão
<b>OAA</b>	<i>Open Agent Architecture</i>
<b>OM</b>	Operador de Mercado
<b>OMI</b>	Operador de Mercado Ibérico
<b>OMIE</b>	<i>Operador del Mercado Ibérico de Energia</i> - Pólo Español
<b>OMIP</b>	Operador do Mercado Ibérico de energia - Pólo Português
<b>OS</b>	Operador de Sistema
<b>PAC</b>	Participação Activa dos Consumidores
<b>PBP</b>	<i>Price - Based Programs</i>
<b>Repast</b>	<i>Recursive Porous Agent Simulation Toolkit</i>
<b>RTP</b>	<i>Real Time Pricing</i>
<b>SCBE</b>	Simulador de Contratos Bilaterais de Electricidade
<b>SEN</b>	Sistema Eléctrico Nacional
<b>SENV</b>	Sistema Eléctrico Independente ou não Vinculado
<b>SEP</b>	Sistema Eléctrico de Serviço Público
<b>SEPIA</b>	<i>Simulator for the Electric Power Industry Agents</i>
<b>SIMEPAC</b>	Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores
<b>SMA</b>	Sistema Multi-Agente
<b>SMEE</b>	Simulador de Mercado de Energia
<b>TOU</b>	<i>Time of Use</i>



# Nomenclatura

$\delta_{final}$	.....	parâmetro final de procura do benefício
$\delta_{inicial}$	.....	parâmetro inicial de procura do benefício
$\delta_m$	.....	valor da margem mínima e máxima para a quantidade total
$\Delta_p$	.....	parâmetro de procura do preço
$\Delta_v$	.....	parâmetro de procura do volume
$Ag_c$	.....	agente comprador
$Ag_v$	.....	agente vendedor
$B_{actual}^v$	.....	benefício actual do agente do $Ag_v$
$B_{possível}^v$	.....	benefício possível do agente $Ag_v$
$B_{cmp}$	.....	benefício da proposta a enviar
$B_{min}$	.....	benefício mínimo do agente $Ag_v$
$B_{rcv}$	.....	benefício da proposta recebida
$Benefício$	.....	benefício do agente $Ag_v$
$C_{possível}^c$	.....	custo possível do agente $Ag_c$
$C_{cmp}$	.....	custo da proposta a enviar
$C_i$	.....	custo da produção, para o período $i$
$C_{max}$	.....	custo máximo do agente $Ag_c$
$C_{rcv}$	.....	custo da proposta recebida
$Custo$	.....	custo da energia do agente $Ag_c$
$d_p$	.....	a distância entre os preços
$i$	.....	período de uma proposta, $i \in [1; 6]$

$k$	.....	percentagem, $k \in [0; 100]$
$P_{i_{anterior}}^c$	.....	preço da proposta anterior do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$P_{i_{max}}^c$	.....	preço máximo do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$P_{i_{min}}^c$	.....	preço mínimo do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$P_{i_{novo}}^c$	.....	preço da nova proposta do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$P_{i_{t_{n+1}}}^c$	.....	proposta de preço do agente $Ag_c$ , no período $i$ , no instante $t_{n+1}$
$P_{i_{t_n}}^c$	.....	proposta de preço do agente $Ag_c$ , no período $i$ , no instante $t_n$
$P_{i_{max}}^v$	.....	preço máximo do agente $Ag_v$ do período $i$
$P_{i_{min}}^v$	.....	preço mínimo do agente $Ag_v$ do período $i$
$P_{i_{t_{n+1}}}^v$	.....	proposta de preço do agente $Ag_v$ , no período $i$ , no instante $t_{n+1}$
$P_{i_{t_n}}^v$	.....	proposta de preços do agente $Ag_v$ , no período $i$ , no instante $t_n$
$P_i^v$	.....	preço do agente $Ag_v$ , para o período $i$
$prop_{t_{n+2}}$	.....	proposta enviada por um agente após o envio da proposta $prop_{t_n}$
$prop_{t_n}$	.....	proposta num determinado instante $t_n$
$T$	.....	conjunto de instantes do tempo $t_n$
$t_n$	.....	instante do tempo genérico $t_n$ , $t_n \in N$
$V_{i_{max}}^c$	.....	volume máximo do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$V_{i_{min}}^c$	.....	volume mínimo do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$V_{i_{t_{n+1}}}^c$	.....	volume do agente $Ag_c$ , o para o período $i$ , no instante $t_{n+1}$
$V_i^c$	.....	volume do agente $Ag_c$ , para o período $i$
$V_{tot}^c$	.....	volume total do agente $Ag_c$

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

Este capítulo introduz o contexto do trabalho realizado no âmbito da presente dissertação. O capítulo começa por fornecer uma visão global do Mercado de Energia Eléctrica, abordando os processos de reestruturação do sector eléctrico, bem como vários aspectos inerentes ao desenvolvimento da dissertação, sendo de realçar a Participação Activa dos Consumidores e os Sistemas Multi-Agente. De seguida, o capítulo descreve as motivações que levaram à realização da dissertação, os seus principais objectivos, e por fim apresenta a sua organização.

## 1.1 Aspectos Gerais e Enquadramento

A energia eléctrica tem assumido grande importância nas ultimas décadas, tornando-se num bem de consumo essencial no dia a dia das várias sociedades. A electricidade é consumida por todo mundo e apresenta hoje em dia uma infinidade de usos, devido ao facto de ser fácil de controlar, ser uma forma de energia limpa e estar acessível em diversos locais. No sector eléctrico são normalmente identificadas quatro grandes actividades, nomeadamente o transporte, a distribuição, a produção e a comercialização de energia eléctrica. A energia é em grande parte produzida em centrais e parques onde os principais recursos são o gás, carvão, recursos hídricos e outros recursos renováveis. A energia produzida é introduzida na rede de transporte em Alta Tensão (AT) ou Muito Alta Tensão (MAT), que a transporta até às redes de distribuição a níveis de tensão mais baixos (Média Tensão (MT) ou Baixa Tensão (BT)), para satisfação das necessidades dos consumidores finais. Uma parte da energia produzida, nomeadamente a proveniente de energias renováveis, é injectada directamente nas redes de distribuição em níveis de tensão mais baixos, de acordo com a tecnologia com que é produzida.

Nos últimos anos, o sector eléctrico dos diversos países tem sofrido grandes alterações, devido principalmente à sua reestruturação. Tipicamente, a organização deste sector era baseada em empresas verticalmente integradas, desde a produção até à venda de electricidade, onde se produzia, transportava e distribuía a energia eléctrica, sem qualquer concorrência. Com o fim dos monopólios foi possível introduzir a concorrência em alguns sectores de actividade, nos quais esta não existia. A nova estrutura está associada à liberalização das actividades do sector eléctrico, cujo objectivo é alcançar um modelo de Mercado de Energia Eléctrica (MEE) livre, competitivo e concorrente, permitindo garantir melhores condições para os consumidores finais de energia, nomeadamente preços mais baixos.

O processo de reestruturação começou no início dos anos 90 e basicamente separou as funções de geração de electricidade e retalho dos monopólios naturais de transmissão e distribuição. Este processo levou à implementação de um mercado grossista, em que os agentes produtores de electricidade fornecem o resultado da sua produção aos retalhistas presentes na comercialização de electricidade, e um mercado retalhista, em que os retalhistas asseguram o fornecimento aos consumidores finais. Os consumidores têm a possibilidade de escolher o seu fornecedor de electricidade consoante as melhores ofertas. A introdução da competição na produção de energia revelou-se um passo importante na inovação e eficiência da indústria eléctrica, permitindo, em teoria, beneficiar todos os consumidores finais (Lopes et al., 2010).

Com a liberalização, a evolução das condições no mercado retalhista, nomeadamente no que diz respeito ao preço da electricidade, é principalmente condicionada pela evolução do mercado grossista, pois este determina uma grande parte dos custos totais

de energia com o fornecimento de electricidade. Os custos de energia são uma componente importante da liberalização do MEE, pois correspondem à parcela que pode ser livremente negociada entre o consumidor final e o respectivo fornecedor (ERSE, 2012b). No entanto, deve-se ter em conta que o sector eléctrico obedece a regras específicas.

O mercado retalhista desempenha um papel importante no MEE, pois permite realizar negociações entre os retalhistas e os compradores finais. As negociações contratuais, realizadas entre duas partes, têm como objectivo definir o preço e a quantidade de energia transaccionada durante um período de tempo acordado. Para evitar a incerteza dos preços *spot*<sup>1</sup>, foram introduzidos no MEE os contratos bilaterais. Estes contratos estabelecem o fornecimento de uma determinada quantidade de energia eléctrica, num determinado período de tempo a um determinado preço, fixando este preço para a determinada quantidade para o período combinado (Azevedo, 2002). A negociação é um processo que permite solucionar conflitos, em que os participantes podem efectuar trocas de propostas e contrapropostas para alcançar acordos benéficos para ambas as partes envolvidas. De forma a que a negociação seja rentável, isto é, permitir obter um maior lucro para os produtores de energia e proporcionar preços mais baixos aos consumidores finais, é necessário implementar várias estratégias de negociação.

Uma das estratégias de negociação, que actualmente tem suscitado mais interesse, está relacionada com as medidas de utilização eficiente de energia eléctrica promovidas pelas empresas produtoras de energia, designadas normalmente como acções de Participação Activa dos Consumidores (PAC) (Apolinário et al., 2006). A PAC pode ser definida como a capacidade de gerir o consumo de electricidade dos consumidores finais e em resposta fornecer condições apropriadas, nomeadamente reduzir o preço de electricidade, melhorar a fiabilidade do sistema e diminuir a volatilidade dos preços. É um conceito relativamente simples cujos benefícios são principalmente usufruídos pelos consumidores finais, sendo também considerada uma solução mais rápida, mais limpa, mais barata e mais fiável, em comparação com a adição de uma nova central eléctrica, durante os períodos de preço elevado.

No mercado grossista actuam os produtores e os comercializadores (retalhistas, agregadores, entre outros). Neste mercado, os produtores de energia eléctrica têm a possibilidade de fornecer a energia produzida aos diversos comercializadores. Os produtores podem vender a sua energia através de contratos bilaterais estabelecidos com os comercializadores, ou realizar contratos de venda de energia em regime de modelo *pool*, onde os envolventes no mercado efectuem licitações de compra e venda.

O mercado retalhista é constituído pelos comercializadores (retalhistas, agregadores, entre outros) e consumidores finais. Este mercado permite realizar transacções entre os comercializadores e os consumidores finais. Os consumidores finais podem escolher

---

<sup>1</sup>Preço *spot* – preço de uma transacção no mercado *spot* (mercado bolsista). Nos mercados *spot* são negociados activos para entrega imediata.

os seus comercializadores, acordando o preço e as condições de fornecimento, através de contratação directa, utilizando os contratos bilaterais. Actualmente, a estrutura do mercado retalhista assenta na coexistência de duas formas de contratação de fornecimento de energia eléctrica (ERSE, 2009):

1. Contratação em mercado regulado, através de contratos bilaterais, ou no mercado organizado, através de aplicação de tarifas integrais reguladas;
2. Contratação em mercado liberalizado, com as condições de negociação de energia a serem definidas entre as partes e a componente de acesso às redes a ser aplicada através de preço regulado.

Contudo, devido às alterações realizadas no sector eléctrico, torna-se necessário compreender as complexas interações entre os vários participantes no MEE. De modo a facilitar e ajudar a gerir a complexidade dos mercados eléctricos, em particular os mercados retalhistas, no sentido de providenciar a sustentabilidade a longo prazo, são utilizados agentes de *software* com competências de negociação. Os agentes são sistemas computacionais capazes de acções flexíveis e autónomas com o propósito de atingir os objectivos do projecto (Lopes et al., 2010). Assim, surgem os conceitos de agente autónomo e Sistema Multi-Agente (SMA) que representam uma nova abordagem para investigar, projectar e implementar sistemas complexos. Esta abordagem está em rápida expansão e apresenta uma gama de métodos e técnicas provenientes de áreas como Computação Distribuída, Engenharia de *Software*, Inteligência Artificial, entre outros. Os agentes são usados numa variedade de aplicações, desde sistemas relativamente pequenos (por exemplo, filtros de *e-mail* personalizado) até sistemas com maior complexidade (por exemplo, controlo de tráfego aéreo) (Jennings et al., 1998).

Enquadrado neste contexto, a presente dissertação envolve o desenvolvimento de um modelo de mercado liberalizado relativo aos contratos bilaterais, propondo-se expandir uma ferramenta de simulação baseada em tecnologia multi-agente, através do desenvolvimento de estratégias de negociação entre os agentes retalhistas presentes na comercialização de energia e os consumidores finais, por forma a tornar possível a simulação da negociação bilateral <sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>O trabalho foi realizado no âmbito do projecto MAN-REM: Negociação Multi-Agente e Gestão de Risco em Mercados de Energia Eléctrica (FCOMP-01-0124-FEDER-020397), suportado por fundos nacionais e pelo FEDER, através do programa COMPETE – Programa Operacional Temático Factores de Competitividade.

## 1.2 Motivações

Os mercados liberalizados de electricidade são uma nova realidade. O processo de reestruturação do sector eléctrico permitiu a sua evolução para um mercado liberalizado, aumentando a sua complexidade. Por esta razão, torna-se necessário compreender as suas interacções, de modo a encontrar soluções para melhorar o sistema a nível económico, técnico e ambiental. A liberalização também introduziu a competição entre produtores de energia. A competição no sector eléctrico representa um bom instrumento para melhorar a eficiência do fornecimento de electricidade por parte dos produtores. No entanto, a abertura à competitividade também exige às empresas produtoras uma adaptação à nova realidade, tendo as mesmas que adoptar estratégias mais elaboradas e eficazes para o processo de fornecimento.

A primeira motivação deste trabalho consiste na adopção de estratégias direccionadas para a eficiência energética, nomeadamente a participação activa dos consumidores, que é especialmente importante no âmbito dos mercados competitivos de energia eléctrica. Uma participação mais activa dos consumidores poderá melhorar a fiabilidade do sistema, bem como possibilitar a redução dos custos (do ponto de vista dos consumidores), garantido sempre os requisitos mínimos de conforto. Uma vez que os níveis de participação activa dos consumidores baixaram, desde a introdução da competitividade no mercado de energia eléctrica, torna-se necessários desenvolver novos modelos para tirar pleno partido da PAC.

A segunda motivação reside no facto de existir uma necessidade crescente de desenvolver modelos computacionais para simular e analisar as tomadas de decisões estratégicas por parte dos participantes do mercado, de modo que as empresas comercializadoras tenham um suporte de apoio. Estes simuladores serão indispensáveis no que se refere aos vários desafios colocados pelos mercados competitivos de energia eléctrica.

A terceira e última motivação para abordar o tema da negociação bilateral em mercados de energia eléctrica multi-agente, com participação activa dos consumidores, advém da necessidade de dar resposta aos novos desafios que a liberalização do sector eléctrico veio trazer aos participantes no mercado, nomeadamente aos agentes retalhistas e aos agentes consumidores de energia, através do desenvolvimento de novas estratégias de negociação.

## 1.3 Objectivos

Os principais objectivos deste trabalho consistem em:

- Estudar e incluir a participação activa dos consumidores na contratação bilateral em mercados de electricidade. Desenvolver estratégias de negociação com PAC, para agentes consumidores;
- Realizar um estudo da interacção entre o preço a estabelecer em cada hora e o volume de energia consumida, com particular incidência sobre o seu efeito na contratação bilateral de energia no mercado de retalho;
- Partindo de um simulador já existente (Simulador de Contratos Bilaterais de Electricidade (SCBE) (Pereira, 2011)), desenvolver um novo Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores (SIMEPAC), incluindo a implementação de estratégias de negociação para a compra de energia eléctrica por parte dos consumidores;
- Estudar detalhadamente dois casos práticos referentes ao mercado de energia liberalizado, em particular ao mercado de retalho, incluindo a negociação de contratos bilaterais entre um agente retalhista e um agente consumidor final de energia. Neste estudo serão consideradas seis tarifas reais diárias para o consumo de energia eléctrica.

A presente dissertação pretende fazer uso do potencial da tecnologia baseada em agentes no desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permita apoiar a negociação de contratos bilaterais entre comercializadores e consumidores, em mercados retalhistas. Para a implementação do trabalho pretende-se utilizar a linguagem de programação JAVA e a plataforma multi-agente JADE <sup>3</sup>.

## 1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. O actual capítulo apresenta uma introdução sucinta dos aspectos gerais da dissertação, indicando os principais temas abordados e expondo as motivação e os objectivos que se pretendem atingir.

O Capítulo 2 efectua o enquadramento dos Mercados de Energia Eléctrica (MEE) liberalizados, apresenta algumas estruturas de mercados, descreve de forma breve o Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL), e apresenta os principais eventos que levaram a evolução deste. O capítulo também descreve a Participação Activa dos Consumidores (PAC), apresentando a sua definição, importância e benefícios.

---

<sup>3</sup>JADE - Java Agent DEvelopment Framework (<http://jade.tilab.com>).



No Capítulo 3, introduz-se o conceito de agente e Sistema Multi-Agente (SMA) realçando-se as suas principais características. É também descrito o modelo de negociação entre agentes autónomos e apresenta-se algumas plataformas computacionais existentes. O capítulo ainda descreve um mercado de energia multi-agente, constituídos por vários agentes autónomos. Por fim, descreve-se algumas ferramentas de simulação de mercados de energia.

O Capítulo 4 descreve o processo de negociação bilateral entre o agente retalhista e o consumidor final de energia eléctrica. Além disso, também apresenta o planeamento e a preparação da negociação dos agentes, identificando os itens a negociar, os limites, descreve um protocolo de ofertas alternadas e as estratégias de negociação desenvolvidas.

No Capítulo 5, a primeira parte começa por apresentar o simulador multi-agente desenvolvido na presente dissertação, e a segunda parte descreve os casos de estudos propostos referentes a uma contratação bilateral, e analisa os resultados obtidos através da simulação.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho realizado. Neste capítulo, também são indicados os tópicos que podem ser abordados em trabalho futuro.



---

## Capítulo 2

# Mercados de Energia Eléctrica

---

O foco principal deste trabalho é a simulação do Mercado de Energia Eléctrica liberalizado com base numa abordagem Multi-Agente. Visto que a área de aplicação consiste nos Mercados de Energia Eléctrica, torna-se necessário explorar um pouco mais este domínio. Assim, este capítulo descreve, de forma sucinta, a constituição do Mercado de Energia Eléctrica. O capítulo começa por apresentar a evolução do Mercado de Energia Eléctrica, descrevendo alguns tipos de modelos de mercados, colocando a ênfase no modelo de contratos bilaterais. De seguida, descreve de forma breve o Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL), apresentando os principais eventos que levaram ao seu desenvolvimento, e caracterizando as funcionalidades dos seus participantes. Por fim, o capítulo apresenta um dos temas com mais relevância para a presente dissertação, nomeadamente a Participação Activa dos Consumidores ou *Demand Response*, indicando a sua definição, importância e benefícios.

## 2.1 Evolução do Mercado de Energia Eléctrica

Até um passado relativamente recente, o sector eléctrico nos mais diversos países caracterizava-se por uma estrutura de monopólio, genericamente organizado, em torno de um conjunto de empresas verticalmente integradas de propriedade maioritariamente estatal. Esta estrutura era responsável pela produção, transporte e distribuição de energia eléctrica aos consumidores finais. A filosofia de negociação em regime de monopólio garantia às empresas que operavam no sector eléctrico a total recuperação dos seus custos através de uma tarifa, devidamente regulada, paga pelo consumidor final. Este modelo de integração vertical permitiu o desenvolvimento de centrais produtoras, bem como de redes de transporte e distribuição (Gomes, 2005).

No entanto, devido às necessidades de redução de custos de energia eléctrica, aumento de eficiência dos sistemas eléctricos, fornecimento de um produto com melhor qualidade e possibilidade do consumidor final escolher o seu produtor de energia, tem-se vindo a observar uma reestruturação do sector eléctrico. Esta reestruturação consistiu basicamente na liberalização dos segmentos potencialmente competitivos, como a produção e a comercialização, e na regulação dos segmentos normalmente considerados como monopólios naturais, como o transporte e a distribuição, permitindo a criação de um mercado grossista e um mercado retalhista. Um outro aspecto, que levou à reestruturação do sector eléctrico, consiste no surgimento de novas tecnologias de geração de energia, como por exemplo as turbinas a gás de ciclo combinado, ou os avanços dos aproveitamentos em energias renováveis, como a energia eólica, possibilitando uma maior concorrência na produção de energia.

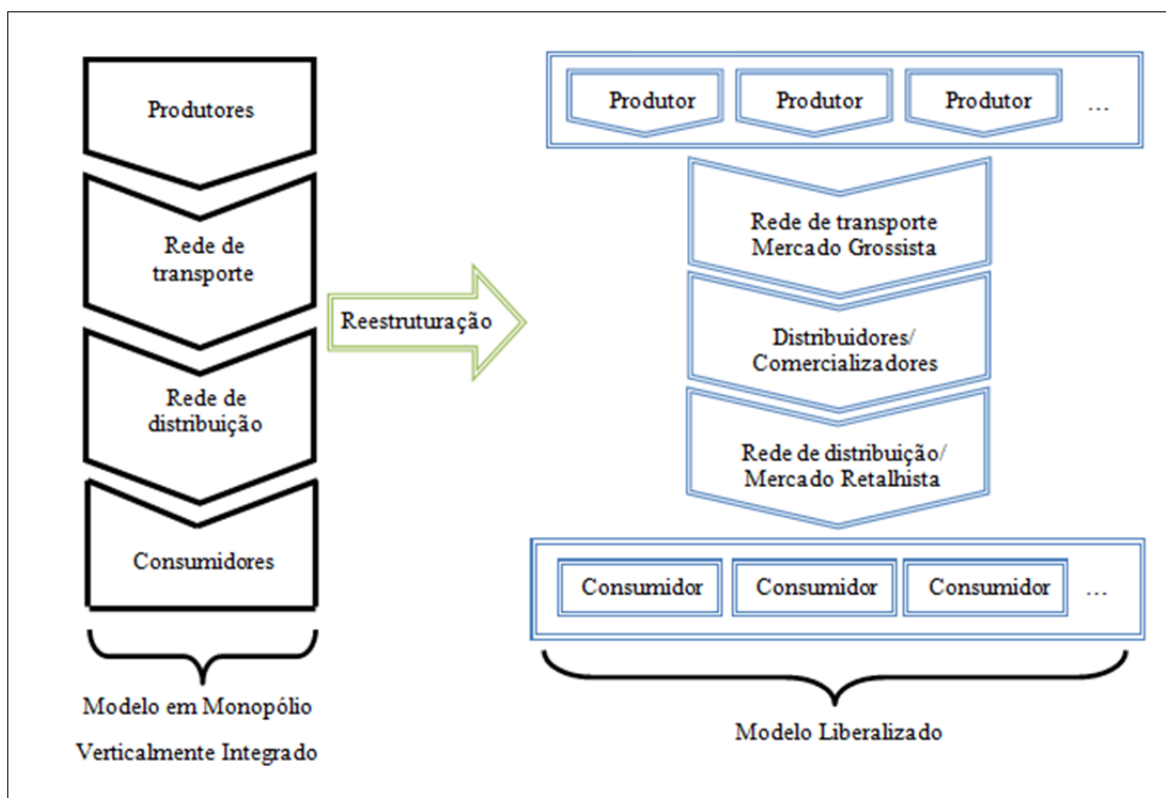
A reestruturação do sector eléctrico iniciou-se a partir dos finais da década de 70, onde o modelo organizacional tradicional começou a ser posto em causa nos Estados Unidos da América (EUA), depois do primeiro choque petrolífero, com a publicação em 1978 da PURPA<sup>1</sup>. Contudo, foi no início da década de 90 que o processo de reestruturação sofreu uma evolução significativa, motivado essencialmente pelos potenciais benefícios decorrentes da separação das actividades da rede — estritamente monopolistas — de produção e comercialização. A Figura 2.1 apresenta a estrutura do modelo de mercado em monopólio verticalmente integrado e do modelo de mercado liberalizado.

Na Europa, o movimento de reestruturação teve início na Grã-Bretanha, com o *Energy Act* de 1983, que estabeleceu a obrigação legal de compra da energia produzida pelos produtores independentes, surgindo a privatização das empresas eléctricas e a criação de um mercado grossista obrigatório ou *spot*, que entrou em actividade em 1990. Este modelo veio a ser alterado com a criação do NETA<sup>2</sup>, em 2001, que eliminou o mercado *spot* obrigatório, permitindo a contratação bilateral entre produtores

---

<sup>1</sup>PURPA – *Public Utility Regulatory Policies Act*

<sup>2</sup>NETA – *New Electricity Trading Arrangements*



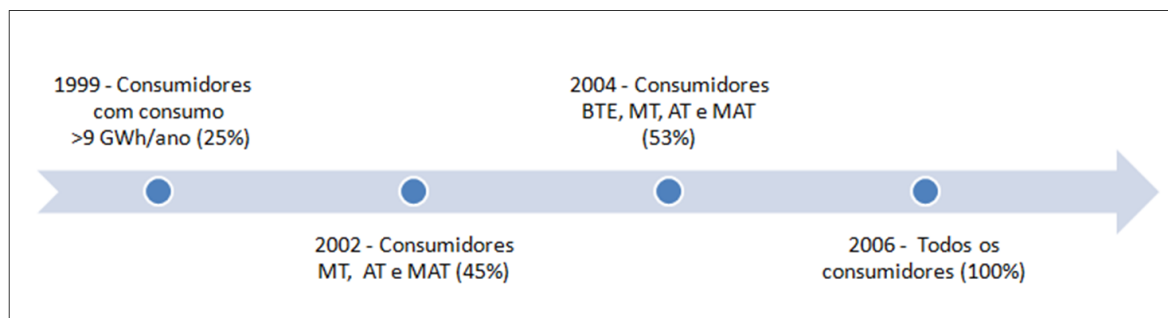
**Figura 2.1:** Modelo em monopólio verticalmente integrado e modelo liberalizado (Azevedo, 2007).

e consumidores finais. No dia 1 de Abril de 2005 foi criado um mercado grossista de energia eléctrica único para a Grã-Bretanha, com a inclusão da Escócia, através da implementação do BETTA<sup>3</sup>. As principais características deste mercado consistem num elevado número de participantes. Em 1996, foi criado o mercado *NordPool*, constituído inicialmente por Noruega e Suécia, e incluindo posteriormente a Finlândia e a Dinamarca, sendo este o primeiro e o maior mercado multinacional do mundo (Paiva, 2007).

### 2.1.1 Liberalização do Sector Eléctrico em Portugal

A liberalização do sector eléctrico na maioria dos países europeus foi realizada por etapas, tendo começado por abranger os clientes de maior consumo e níveis de tensão mais elevados. Em Portugal foi seguida uma metodologia idêntica, tendo a abertura do mercado sido efectuada de forma progressiva, com início em 1995 para os grandes consumidores industriais, e sucessivamente alargada a todos os consumidores em muito alta, alta, média e baixa tensão especial (potência contratada superior a 41,4 kW). A partir de 4 de Setembro de 2006 todos os consumidores em Portugal Continental começaram a poder escolher o seu fornecedor de energia eléctrica (ERSE, 2012b).

<sup>3</sup>BETTA – *British Trading and Transmission Arrangements*



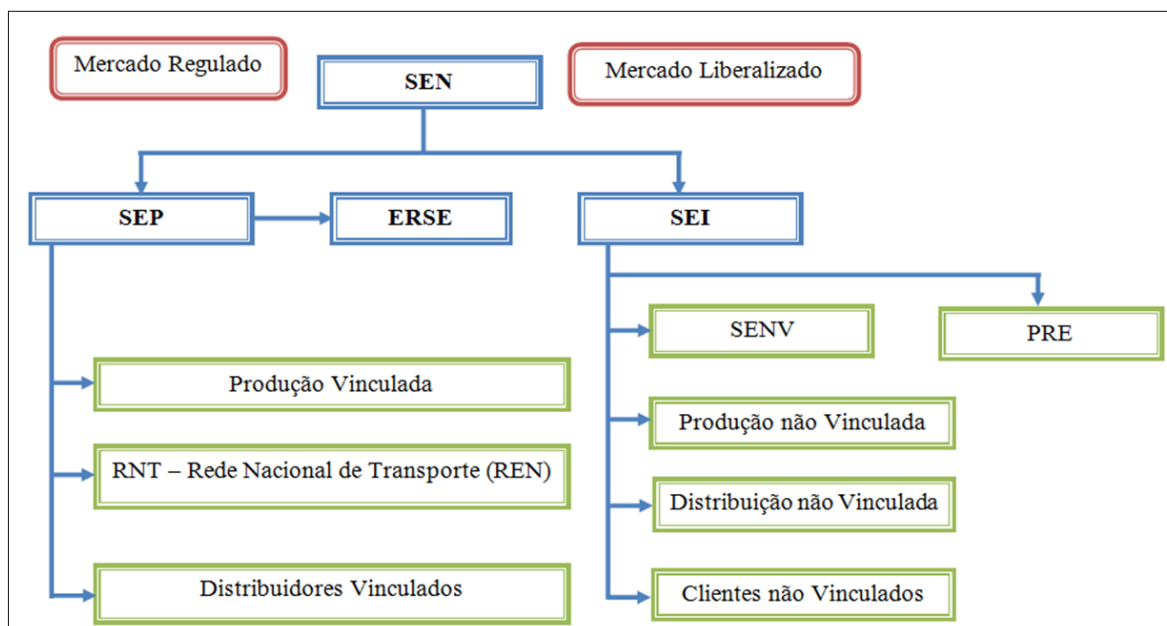
**Figura 2.2:** Calendarização da abertura do mercado português de energia eléctrica (ERSE, 2012b).

A Figura 2.2 apresenta a evolução gradual da liberalização do mercado para os consumidores finais. Identificam-se quatro períodos distintos de aplicação da regulamentação sobre a abertura do mercado de fornecimento de energia eléctrica, nomeadamente:

- Até 31 de Dezembro de 2001, foram consideradas elegíveis para efectuarem a livre escolha de fornecedor, as instalações consumidoras de energia eléctrica em Media Tensão (MT), Alta Tensão (AT) e Muito Alta Tensão (MAT), com o consumo anual mínimo de 9 GW.
- Entre 1 de Janeiro de 2002 e o final de Fevereiro de 2004, foram consideradas elegíveis todas as instalações consumidoras de energia eléctrica em MAT, AT ou MT, com consumo efectivo ou previsto não nulo.
- Em 2004, com a publicação do Decreto-Lei n.º 36/2004, de 26 de Fevereiro, passaram a ser igualmente elegíveis os consumidores em Baixa Tensão Especial (BTE), com consumo efectivo ou previsto não nulo.
- Ainda no decorrer de 2004, com a publicação do Decreto-Lei n.º 192/2004, de 17 de Agosto, o direito de elegibilidade foi alargado a todos os clientes em Portugal continental. O exercício efectivo de escolha do fornecedor por parte dos clientes de energia eléctrica em BTE aguardou a completa implementação do sistema informático necessário para gerir os procedimentos de mudança de fornecedor, cuja data de entrada em operação ocorreu a 4 de Setembro de 2006.

A liberalização do sector eléctrico foi marcada pela reprivatização da EDP<sup>4</sup> e pela afirmação do princípio de liberdade de acesso às actividades de produção e distribuição de energia eléctrica, através da definição de um Sistema Eléctrico Nacional (SEN) baseado na coexistência de um Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP), no Mercado Regulado, e de um Sistema Eléctrico Independente ou não Vinculado (SENV), no Mercado Liberalizado. Simultaneamente, consagra-se a regulação do sector eléctrico através

<sup>4</sup>EDP – Energias de Portugal, S. A.



**Figura 2.3:** Organização do sistema eléctrico em Portugal (Azevedo, 2002).

da criação de uma entidade administrativa independente: a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). A Figura 2.3 apresenta a organização do sistema eléctrico em Portugal.

A organização do SEN é estabelecida na coexistência de um Mercado Liberalizado com um Mercado Regulado. Desta forma, os agentes económicos têm a opção de criar relações contratuais com o comercializador regulado, ao abrigo das condições aprovadas pela ERSE, ou negociar outras condições com os comercializadores em Mercado Liberalizado. O SEN pode ser dividido em quatro actividades principais: produção, transporte, distribuição e comercialização, a que acresce a operação dos mercados organizados de electricidade que, em regra, são desenvolvidas de forma independente.

No dia de 14 de Novembro de 2001 foi criado o Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL), em consonância com as políticas comunitárias, através de um protocolo entre os governos de Portugal e Espanha. O MIBEL integra oficialmente os dois mercados liberalizados desde 1 de Julho de 2007, data imposta pela Directiva n.º2003/54/CE (ver a Secção 2.4 para mais detalhe sobre o MIBEL).

Em 2006, ocorreu a abertura total do mercado retalhista, separando as actividades de distribuição e comercialização de energia. A distribuição mantém-se como responsabilidade da EDP-Distribuição. A comercialização é efectuada pelos agentes que operavam no SENV, assim como o comercializador de último recurso (EDP Serviço Universal), que fornece os clientes com tarifas reguladas pela ERSE.

A partir de 2007, os produtores de energia passaram a ter capacidade de fornecer energia no mercado livre competitivo, bem como estabelecer contratos bilaterais com distribuidores e comercializadores.

## 2.2 Modelos de Mercado

Existem vários modelos para a estrutura do mercado, sendo de realçar os seguintes: bolsa ou *pool*, contratos bilaterais e mistos. O modelo de contratos bilaterais é descrito com mais detalhe na Secção 2.3, visto ser um dos temas abordados com maior ênfase na presente dissertação. De seguida, são apresentadas as três estruturas de mercado referidas.

### 2.2.1 Modelo em Bolsa ou *pool*

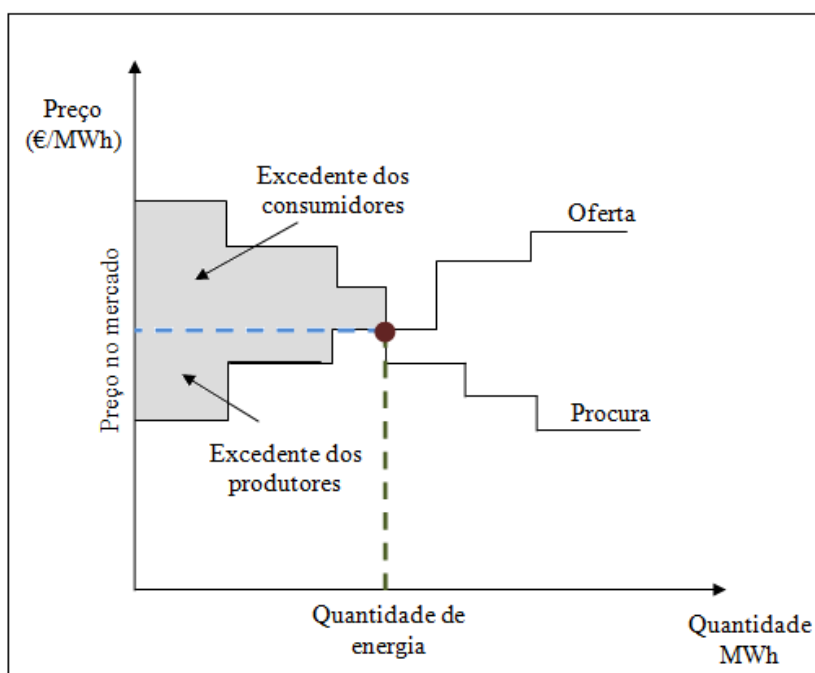
O modelo em bolsa ou *pool* corresponde aos mercados *spot* centralizados. A precursora foi criada em 1990, em Inglaterra e Gales, vindo a ser extinta em 2001, com a criação do NETA. Actualmente, mantém-se ainda na Escandinávia (*NordPool*), em Espanha, na Austrália, na Nova Zelândia e em alguns estados dos EUA (Paiva, 2007).

Estes mercados incluem mecanismos de curto prazo, pretendendo-se equilibrar a produção e o consumo. Os preços de compra e as quantidades de energia a fornecer são na maioria dos casos fixados *ex-ante* por meio de um leilão competitivo, com base na carga programada. Os preços finais de venda são fixados com base nos preços de compra, adicionados aos custos dos serviços de sistema, que asseguram o balanço final entre produção e consumo.

Em alternativa, os preços são fixados *ex-post*, a partir do fornecimento e da procura efectivamente registados. Neste caso, o preço de aquisição da *pool* e o preço de venda coincidem.

Numa *pool* com fixação de preço *ex-ante*, cada um dos participantes expõe uma lista de compras e vendas. Nesta lista são indicados o preço e a quantidade de energia para cada período de tempo, normalmente uma hora (ou meia hora) ao longo das 24 horas. As ofertas de compra e venda são agrupadas e fornecem, por cada período, as curvas representadas na Figura 2.4. Nesta figura, a intersecção proporciona o preço de mercado bem como a quantidade de energia a transaccionar. O preço de mercado, pago a todos os produtores, é o preço do grupo gerador mais caro, denominado preço marginal do sistema. A área sombreada corresponde ao excedente social, ou seja à diferença entre os excedentes dos consumidores e dos produtores. Uma explicação mais detalhada do modelo em bolsa pode ser encontrada em (Paiva, 2007).





**Figura 2.4:** Fixação do preço de mercado para um período de tempo (Paiva, 2007).

### 2.2.2 Modelo de Contratos Bilaterais

Os contratos bilaterais surgem de forma a estabilizar os preços do mercado. São contratos realizados directamente entre duas entidades, com preços, termos e condições negociados livremente.

Podem ser distinguidos dois tipos de contratos bilaterais, os físicos e os financeiros, com particularidades distintas (Ferreira, 2007). Os contratos bilaterais físicos são executados normalmente a longo prazo, estabelecidos entre duas partes, onde uma parte compromete-se a colocar a energia eléctrica na rede (vendedor) e a outra parte recebe a energia eléctrica contratada (comprador). Os preços e condições do contrato são negociáveis. É um modelo que garante segurança em relação ao preço, uma vez que este é fixado para um longo período de tempo (pela sua importância para a presente dissertação, este modelo de contratos vai ser descrito com mais detalhe na Secção 2.3).

Os contratos bilaterais financeiros fornecem um seguro contra a volatilidade referente aos mercados de energia, uma vez que os preços em mercados competitivos reagem rapidamente às variações da oferta e procura. Para garantir a segurança das partes envolvidas, devido ao risco inerente ao mercado, podem ser aplicados vários modelos de contratos, incluindo contratos por diferenças, de futuro e de opções (Paiva, 2007).

### 2.2.3 Modelo Misto

O modelo misto combina os dois tipos de modelos analisados anteriormente. A maior parte dos países onde ocorreu a reestruturação do sector eléctrico usa este tipo de modelo.

No modelo misto, a utilização da bolsa corresponde a um mecanismo voluntário, na medida em que os consumidores podem transaccionar energia directamente com os produtores ou podem optar negociar na bolsa, aceitando o preço de mercado.

Neste modelo, a maioria das transacções são realizadas por contratos bilaterais. No entanto, o preço da energia é obtido no mercado em bolsa, que constitui uma referência importante para a negociação de contratos bilaterais (Ferreira, 2007).

## 2.3 Contratos Bilaterais Físicos

O modelo de contratos bilaterais físicos permite realizar transacções directamente entre duas entidades (por exemplo, empresas produtoras, distribuidoras, consumidores elegíveis e comercializadores), em que os preços, os termos e as condições são negociados livremente entre as partes. No entanto, devem-se ter em conta as limitações técnicas da rede eléctrica relativamente às condições negociadas (a quantidade de energia, a data e o local de entrega da quantidade concordada com o comprador), de modo a garantir a segurança desta.

Com a implementação dos contratos bilaterais físicos, foi necessário atribuir as funções de operação do sistema e do mercado a entidades separadas, nomeadamente ao Operador de Sistema (OS) e ao Operador de Mercado (OM). O OS é a entidade que exerce as funções técnicas de coordenação, sendo responsável por assegurar a segurança da rede, enquanto o OM é a entidade que gere e organiza as transacções entre os participantes. É de salientar que compete ao OM gerir e organizar os contratos bilaterais (Paiva, 2007).

Este modelo possibilita uma maior segurança em relação à estabilidade dos preços, pois é executado a longo prazo, sendo o preço fixado para um período extenso de tempo (por exemplo, seis meses ou mais), evitando assim a volatilidade dos preços de mercado. No entanto, o modelo de contratos bilaterais apresenta alguns pontos de discussão, sendo de realçar (Paiva, 2007):

- Não existe compatibilidade entre um despacho realizado e as normas nos sistemas eléctricos tradicionais e em determinadas bolsas;
- Podem levar à diminuição do número de contratos, pois a transparência dos preços é menor, caso exista um número muito elevado de consumidores a optar por esta modalidade.

## 2.4 Breve Descrição do Mercado Ibérico de Electricidade

O Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) constitui uma iniciativa conjunta dos Governos de Portugal e Espanha. Esta cooperação é benéfica, não só pelo contributo que deu para a existência do mercado de energia eléctrica a nível ibérico, mas também, à escala europeia, sendo um passo significativo para a construção do Mercado Interno de Energia (OMIP, 2012).

O processo de criação do MIBEL tem vindo a evoluir, sendo composto por vários eventos, dos quais são de destacar:

- A celebração, em Novembro de 2001, do protocolo de colaboração entre as Administrações de Espanha e Portugal para a criação do Mercado Ibérico de Electricidade;
- A assinatura, em Outubro de 2004, em Santiago de Compostela, do acordo entre Portugal e Espanha;
- A integração oficial, a 1 de Julho de 2007, dos dois mercados liberalizados (data imposta pela Directiva n.º2003/54/CE);
- A realização em Zamora, a 22 de Janeiro de 2009, da XXIV Cimeira luso-espanhola, tendo ambos os Governos acordado a constituição definitiva do Operador do Mercado Ibérico através da integração dos dois organismos operadores, até 15 de Junho de 2009, e a criação de um grupo de trabalho conjunto para acompanhar este processo, etc.

O MIBEL tem como principais metas (OMIP, 2012):

- Beneficiar os consumidores de electricidade dos dois países, através do processo de integração dos respectivos sistemas eléctricos;
- Estruturar o funcionamento do mercado com base nos princípios da transparência, livre concorrência, objectividade, liquidez, auto-financiamento e auto-organização;
- Favorecer o desenvolvimento do mercado de electricidade de ambos os países, com a existência de uma metodologia única e integrada, para toda a Península Ibérica, de definição dos preços de referência;
- Permitir a todos os participantes o livre acesso ao mercado, em condições de igualdade de direitos e obrigações, transparência e objectividade;
- Favorecer a eficiência económica das empresas do sector eléctrico, promovendo a livre concorrência entre as mesmas.

Devido às diferentes modalidades de evolução dos mercados espanhol e português, a criação do MIBEL envolve algumas dificuldades, das quais se destaca a organização do mercado. Segundo a ERSE, existem alguns pontos de convergência entre os dois países relativamente à organização do MIBEL, como a existência de contratos bilaterais e de um mercado organizado. Assim, a constituição do MIBEL centra-se numa bolsa gerida pelo Operador de Mercado Ibérico (OMI), o qual tem dois pólos: pólo espanhol — OMIE, para os mercados diário e intradiário, e pólo português — OMIP, para o mercado a prazo. Nestes são permitidos contratos bilaterais (Paiva, 2007).

O **Mercado a Prazo** do MIBEL iniciou a sua actividade a 3 de Julho de 2006, assumindo actualmente o estatuto de mercado regulamentado. A gestão do mercado é efectuada pelo OMIP, sendo que a OMIClear<sup>5</sup> desempenha as funções de câmara de compensação, contraparte central e entidade gestora do sistema de liquidação (ERSE, 2009). Este mercado tem como objectivo o estabelecimento de contratos de compra e venda de energia eléctrica a longo prazo (semana, mês, trimestre e ano). É um mercado onde são disponibilizados produtos normalizados, que podem assumir a forma de “blocos de energia” com uma duração fixa e pré-definida.

O **Mercado Ibérico Diário** é um mercado organizado a curto prazo, para entrega de energia em cada um dos 24 períodos horários do dia seguinte, funcionando com ofertas simples (quantidade – preço), sendo todos os produtores remunerados ao preço marginal. Tem constituído uma plataforma de encontro da procura e da oferta de energia eléctrica, de forma fiável e representativa, desde 1 de Janeiro de 1998 para o sistema espanhol, e 1 de Julho de 2007 para o sistema português (ERSE, 2009).

O **Mercado Ibérico Intradiário** é um mercado de ajustes, que permite a participação de todos os agentes, permitindo as mesmas garantias de transparência e possibilidades de supervisão que o mercado diário, independentemente do modo de contratação que elegeram previamente: bilateral, mercado a prazo ou mercado diário.

De forma a permitir o melhor uso possível da capacidade disponível sem comprometer a segurança destes mercados, é utilizado um mecanismo de separação de mercados (*market splitting*) no horizonte diário, método aplicado desde 1 de Julho de 2007, na gestão conjunta da interligação Espanha – Portugal, que segue a proposta formulada pelo Conselho de Reguladores. No âmbito deste mecanismo de separação de mercados, o conjunto do sistema ibérico é tratado como um único mercado na situação em que não existem restrições na interligação, e como duas áreas distintas de preço num mesmo mercado, na situação em que tais restrições existem. O processo de determinação do preço abrange inicialmente as ofertas de compra e de venda em mercado, envolvendo um encontro entre a oferta e a procura. Do processo de encontro de ofertas pode resultar duas situações (ERSE, 2009):

---

<sup>5</sup>OMIClear - Sociedade de Compensação de Mercados de Energia, S.G.C.C.C.C., S.A.

- Se, do encontro de ofertas (de compra e de venda) resultar um trânsito na interligação que seja inferior ou igual à capacidade comercial disponível no mesmo sentido, o preço de encontro é único para o sistema ibérico, já que tem viabilidade económica (conferida pelo encontro de oferta e procura) e técnica (conferida pela existência de capacidade nas redes para concretizar o despacho económico). Nesta circunstância existe integração de mercado;
- Se, do encontro de ofertas (de compra e de venda) resultar um trânsito na interligação que seja superior à capacidade comercial disponível no mesmo sentido, a solução inicial de mercado não é exequível, pelo que as duas áreas de mercado são tratadas em separado, com curvas agregadas de procura e de oferta específicas a cada área. Contudo, na curva de procura para o sistema exportador é colocada uma quantidade correspondente à capacidade comercial na interligação no sentido exportador, e na curva de oferta para o sistema importador consta uma quantidade equivalente. Do encontro das curvas de procura e de oferta agregadas de cada um dos sistemas resultarão os preços para cada uma das áreas de mercado. Nesta situação diz-se que se está em regime de *market splitting*.

Descrevem-se de seguida alguns dos intervenientes no Mercado Ibérico:

- *Operador de Mercado Ibérico* (OMI) – é a entidade responsável pela gestão dos mercados diário, intradiário e a prazo. O OMI realizará as suas actividades em regime exclusivo. A sua actividade é regulada pelos princípios de transparência, objectividade e independência.
- *Operador de Sistema* (OS) – existem operadores de sistema nos dois países e mantêm-se no contexto do MIBEL, sendo responsáveis pela segurança e gestão técnica do sistema em cada uma das suas áreas de controlo.
- *Produtor em Regime Ordinário* (PRO) – os produtores são entidades físicas ou jurídicas que produzem energia eléctrica em regime de concorrência, podendo construir, operar e manter as centrais de produção de energia de que são proprietários. Estas entidades podem estabelecer contratos bilaterais físicos, negociados directamente com os consumidores ou comercializadores, ou participar nos mercados organizados.
- *Consumidor* – os consumidores elegíveis têm direito a escolher livremente o seu fornecedor de energia eléctrica.
- *Comercializador* – estas entidades caracterizam as pessoas jurídicas autorizadas a realizar o fornecimento de energia eléctrica a consumidores elegíveis, podendo vendê-la a produtores ou a outros agentes qualificados.

- *Conselho Ibérico de Regulação* – deste conselho fazem parte representantes dos dois Reguladores, ERSE e CNE<sup>6</sup>.

Nesta fase, é importante referir que a regulação dos preços de energia eléctrica é diferente em Portugal e Espanha. Em Portugal, a ERSE fixa as tarifas, enquanto que em Espanha a CNE propõe e o Governo aprova.

## 2.5 Participação Activa dos Consumidores em Ambiente de Mercado

Ao longo dos últimos anos, devido às várias mudanças que o sector eléctrico tem sofrido, como a reestruturação recente devido à liberalização dos MEE nos países mais desenvolvidos, a filosofia de funcionamento do sistema tem sido alterada. A abordagem tradicional consistia em satisfazer todas as exigências da procura de energia sempre que estas ocorressem. No entanto, a nova filosofia afirma que o sistema será mais eficiente se as flutuações na procura forem mantidas no mínimo possível.

A operação fiável do sistema eléctrico necessita de um equilíbrio perfeito entre a oferta e a procura em tempo real. Este equilíbrio não é fácil de conseguir, dado que tanto a oferta quanto os níveis de procura podem-se alterar rapidamente e de forma inesperada, devido a inúmeras razões, incluindo interrupções forçadas nas unidades de geração, interrupções nas linhas de transmissão e distribuição, e mudanças súbitas de carga (Albadi e El-Saadany, 2007). Além disso, actualmente a energia eléctrica apenas pode ser armazenada em quantidades muito limitadas, devido a razões económicas. Nesta perspectiva, torna-se necessário desenvolver acções de gestão, tanto no lado da oferta como do lado da procura, sendo esta uma das preocupações das sociedades mundiais.

Relativamente à oferta energética, têm vindo a ser implementadas várias soluções para combater a dependência dos combustíveis fósseis na produção de energia eléctrica, à medida que a área das energias renováveis evolui. No que diz respeito à procura, têm vindo a ser levantados vários obstáculos à racionalização do consumo energético. Actualmente, existe cada vez mais a necessidade de adoptar medidas com vista à eficiência no consumo. Estas acções estão ligadas aos conceitos de conservação, gestão e utilização racional de energia. Neste sentido, têm vindo a ser desenvolvidas políticas e programas aplicados aos vários agentes do mercado energético. Um destes programas, com bastante impacto a nível mundial, consiste na Participação Activa dos Consumidores (PAC) ou *Demand Response* (DR), que tem como objectivo alterar os padrões de consumo por parte dos utilizadores do sector eléctrico (FEUP, 2011).

---

<sup>6</sup>CNE – *Comisión Nacional de Energía*

O conceito de PAC pode ser rastreado até os primórdios da indústria de energia eléctrica dos EUA, nos meados de 1890, onde os engenheiros de sistemas e as companhias produtoras discutiram o regime de preço óptimo, sendo os primeiros desempenhos de programas de PAC baseados em taxas que variavam ao longo do dia. O interesse inicial na gestão da carga de energia foi impulsionado, em parte, pela crescente penetração do ar-condicionado, que resultava em picos de energia (Cappers et al., 2010).

A situação presente da PAC no mundo é apresentada, de forma sucinta, em Woo e Greening (2010). Várias implementações de PAC no mercado grossista estão também a ocorrer na Europa (Torriti et al., 2009), China (Wang et al., 2010), bem como noutros lugares (CRA, 2005).

Em muitas partes da Europa, desde o final dos anos 80, as modificações do sector eléctrico, devido à liberalização dos mercados de energia, tiveram consequências sobre o destino das actividades do lado da procura, incluindo a PAC. Algumas iniciativas actuais dizem respeito às tecnologias de energias renováveis e sistemas eficientes de energia. Para além disso, existem vários programas de PAC e iniciativas a nível Europeu, mas não uma única iniciativa integrada, devido à inexistência de um mercado europeu de energia único (Torriti et al., 2009).

Alguns dos programas de PAC em vigor na União Europeia têm-se concentrado nos grandes consumidores industriais, como por exemplo em Espanha e Itália. Na Finlândia, durante vários anos foram usados programas de interrupção da carga de energia em resposta às perturbações na rede. Em 2005, o potencial total da PAC na indústria finlandesa foi estimado em cerca de 1280 MW, o que representa 9% do pico de procura de energia finlandês. Em França, cerca de 350000 clientes residenciais e mais de 100000 clientes de pequenas empresas utilizam a tarifa *Tempo*. Nesta tarifa, os dias são diferenciados de acordo com o preço, usando um sistema de cores juntamente com uma indicação de que a hora actual faz parte dos oito horários (fora de pico ou não), e os consumidores que adiram a esta tarifa podem ajustar o seu consumo manualmente ou através da selecção de um programa para conexão e desconexão automática (Torriti et al., 2009).

O caso específico de Portugal, em convergência com Espanha, é regulamentado pelo Decreto n.º 592/2010. Os consumidores têm uma remuneração base, dependendo do valor de potência de interrupção, que varia de acordo com várias modalidades. O poder de interrupção mínima é de 0,25 MW. A remuneração base máxima é paga aos consumidores com um poder de interrupção superior a 4 MW. A remuneração base é um pagamento de uma taxa mensal fixa e depende do valor da potência de interrupção (para o consumidor), possuindo também um valor adicional definido para a remuneração de utilização. Para os consumidores que não conseguem cumprir o devido são definidas penalizações, sendo considerado no pior caso a cessação do contrato (DRE, 2010).

Em suma, a aplicação de uma PAC ainda não alcançou os níveis previstos, sendo que algumas das dificuldades relacionadas com a transição das indústrias tradicionalmente reguladas para um ambiente concorrencial podem ser justificadas pela falta de resposta à procura no mercado de retalho (Faria, 2011).

### 2.5.1 Definição da PAC

A Participação Activa dos Consumidores ou *Demand Response* pode ser definida do seguinte modo (USDE, 2006):

*“A alteração do padrão de consumo eléctrico por parte dos consumidores finais em resposta às alterações no preço da electricidade ao longo de tempo ou ao pagamento de incentivos criados com o intuito de induzir o consumidor a reduzir o seu consumo de energia em situações em que o valor de mercado é elevado, ou em situações em que a fiabilidade do sistema esteja em causa.”*

É um conceito relativamente simples cujos benefícios são usufruídos principalmente pelos consumidores finais e os incentiva a reduzirem o seu consumo de electricidade durante os períodos de preço elevado.

O princípio da PAC tem como objectivo básico alterar a tendência da evolução do consumo energético dos consumidores finais, com o propósito de reduzir os custos de exploração do sistema, quer do ponto de vista do produtor, quer do consumidor. A implementação dos programas de PAC na concepção do mercado de energia eléctrica é realizada de forma a melhorar o desempenho do mercado. Espera-se que os programas de PAC melhorem a fiabilidade do sistema, reduzam a volatilidade dos preços, aumentem a eficiência económica e reduzam os preços de energia nas facturas de electricidade dos consumidores.

### 2.5.2 Importância da PAC

A PAC oferece uma variedade de benefícios financeiros e operacionais para os consumidores de electricidade, as entidades fornecedores de energia, e os operadores de rede.

Os sistemas de energia eléctrica têm três características importantes (USDE, 2006):

1. Visto que a electricidade não pode ser economicamente armazenada, a oferta e a procura de energia eléctrica devem ser mantidos em equilíbrio em tempo real;
2. As condições da rede podem mudar significativamente de instante para instante. Os níveis de procura também podem variar rapidamente e de forma inesperada, e como consequência ameaçar a integridade da rede em áreas bastante grandes, muito rapidamente;



3. O sistema eléctrico possui um intensivo capital e o investimento em sistemas de geração e transmissão tem uma amortização longa.

Num mercado competitivo de electricidade, as entidades fornecedoras de energia e os retalhistas compram ou vendem a sua energia com antecedência, considerando que serão capazes de gerar ou comprar uma quantidade de energia suficiente para atender às mudanças na procura do sistema (Faria, 2011).

Estes desafios e incertezas atribuem uma maior importância à PAC, uma vez que esta oferece maior flexibilidade a um custo relativamente baixo. Os operadores de sistema podem usar programas de PAC para limitar, reduzir ou alterar o padrão de cargas, evitando a necessidade de construir mais centrais de geração (FERC, 2008).

### 2.5.3 Benefícios da PAC

O principal benefício da PAC é a melhoria da eficiência do sistema eléctrico, pois estabelece-se uma maior aproximação entre os preços dos consumidores finais de electricidade e o valor atribuído à electricidade. Os diversos benefícios relacionados com este aumento de eficiência podem ser resumidos em quatro grupos, nomeadamente os consumidores finais, o mercado, a fiabilidade e os benefícios do desempenho do mercado (Albadi e El-Saadany, 2007).

Os benefícios financeiros dos consumidores finais são principalmente as poupanças nas suas contas de electricidade, obtidas através da redução do gasto de energia durante os períodos de pico, e variam conforme a escolha do tipo de PAC (ver a Subsecção 2.5.4).

Os preços baixos no mercado grossista apresentam um benefício para o mercado em geral, sendo que a PAC pode evitar a necessidade de uso de geração de energia eléctrica fornecida por centrais eléctricas de alto custo (Faria, 2011).

Um outro benefício diz respeito ao nível de fiabilidade relacionado com a segurança operacional. Através de um programa bem elaborado de PAC, os participantes têm a oportunidade de colaborar na redução do risco de interrupções. Desta forma, podem ser diminuídas as probabilidades e as consequências das interrupções forçadas de electricidade, que envolvam custos financeiros e inconveniências para os consumidores.

Por último, a PAC pode aumentar o desempenho do mercado mitigando o seu poder de mercado constituído por preços de energia elevados acima dos custos de produção. Assim, os participantes têm mais opções, mesmo quando a concorrência no retalho não se encontra disponível. Os consumidores podem gerir o seu consumo, uma vez que têm a oportunidade de interferir no mercado, especialmente através de programas específicos de PAC (ver a Subsecção 2.5.4) (Albadi e El-Saadany, 2007).

### 2.5.4 Tipos de Programas de PAC

Os programas de PAC podem ser divididos em duas grandes categorias, nomeadamente os baseados no incentivo financeiro (IBP<sup>7</sup>) e os baseados no preço pago pela energia (PBP<sup>8</sup>), que têm como propósito implementar várias modalidades para controlar o consumo de energia dos consumidores (Albadi e El-Saadany, 2007).

Os programas IBP incluem programas que forneçam aos consumidores incentivos fixos ou que variem com o tempo, em adição às suas taxas de electricidade. Estes incentivos são apresentados aos consumidores, independentemente do plano tarifário onde estejam inseridos, para realizarem uma redução da carga em situações onde o OS considera que as condições de segurança estejam comprometidas, ou em situações em que o custo da energia seja muito elevado. Nos IBP, os consumidores são remunerados monetariamente pela redução do seu consumo de energia eléctrica nos períodos de tempo solicitados para realizar esta redução. No entanto, alguns destes programas podem penalizar os consumidores que não respeitem os termos contratuais concordados. São normalmente distinguidos seis tipos de programas IBP ((USDE, 2006), (Albadi e El-Saadany, 2007)):

1. ***Direct Load Control (DLC)*** – é um programa em que as companhias produtoras têm a capacidade de interromper o funcionamento dos equipamentos dos consumidores (por exemplo, os dispositivos de ar-condicionado ou arcas frigoríficas) por um curto período de tempo. Este tipo de programa é de interesse dos consumidores residenciais e pequenos consumidores industriais;
2. ***Interruptible/Curtailable Service (ICS)*** – baseia-se em opções de interrupção passiva integrados em tarifas de retalho. Os consumidores que aderem a este programa recebem um incentivo monetário ou uma taxa de descontos com antecedência, por reduzirem a sua carga de energia para valores pré-definidos. Caso os consumidores não cumpram o devidamente acordado, podem sofrer penalidades, dependendo dos termos e das condições do programa. Este programa é normalmente oferecidas aos consumidores industriais;
3. ***Demand Bidding/Buyback (DBB)*** – neste programa, os consumidores finais propõem uma redução específica de carga no mercado grossista. A proposta é aceite se for inferior ao preço do mercado. Caso a proposta seja aceite, o consumidor deve reduzir a sua carga pela quantidade especificada na proposta, podendo ser penalizado em caso de incumprimento. Neste tipo de programa são preferidos consumidores de grande consumo;

---

<sup>7</sup>IBP – *Incentive - Based Programs*

<sup>8</sup>PBP – *Price - Based Programs*

4. ***Emergency Demand Response (EDR)*** – os consumidores que participam neste tipo de programa recebem um incentivo pelas medições da redução da carga durante as condições de emergência;
5. ***Capacity Market (CM)*** – este programa é proporcionado aos consumidores que tenham a capacidade de se comprometerem a fornecer reduções de carga pré-especificadas, com antecedência (por exemplo, meses), quando surgirem eventuais contingências no sistema eléctrico. Os participantes recebem um aviso prévio dos eventos, sendo penalizados caso não cumpram a redução da carga;
6. ***Ancillary Services Market (ASM)*** – este programa permite aos consumidores propor a interrupção de carga no mercado *spot* como reserva operacional. Quando as propostas são aceites, os participantes podem ser recompensados monetariamente conforme o preço do mercado *spot*, por se comprometerem a ficar em espera, e pagos no caso da interrupção de carga ser necessária.

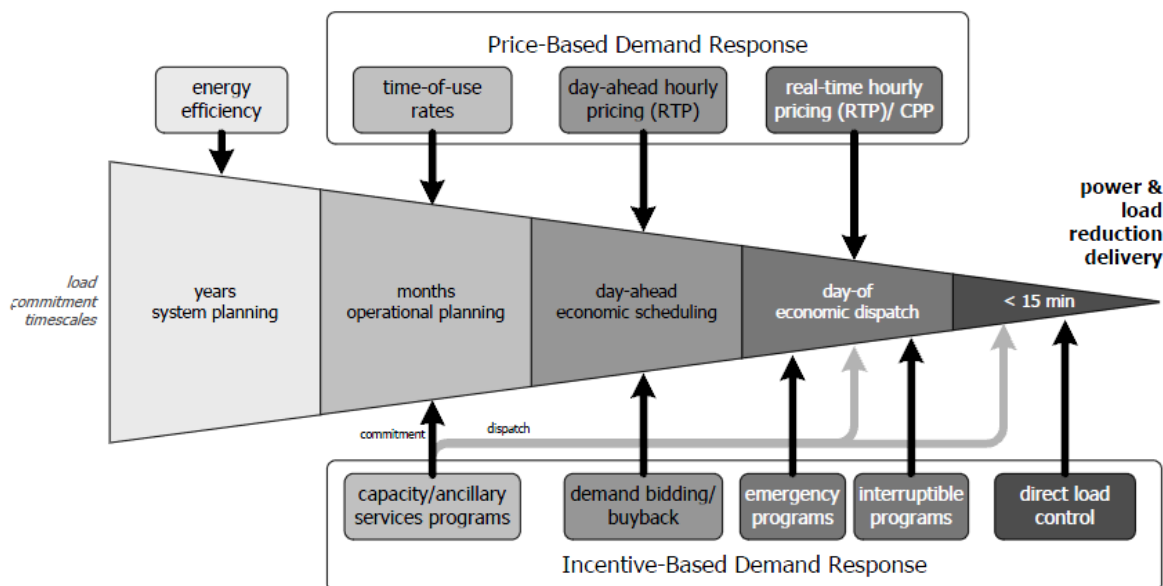
Nos programas de PBP, os consumidores ajustam o seu nível de consumo em resposta às alterações tarifárias. Estes programas são baseados em taxas de preço dinâmico, onde as tarifas de electricidade não são constantes. O objectivo final das programas PBP é nivelar a curva de procura, oferecendo preços elevados durante os períodos de pico, e preços reduzidos fora de pico ((USDE, 2006), (Albadi e El-Saadany, 2007)). Nos PBP são incluídos os seguintes cinco programas:

1. ***Time of Use (TOU)*** – representam taxas de preço de electricidade por unidade de consumo, que diferem em vários blocos por período de tempo. A taxa é maior nos períodos de pico, sendo menor nos períodos fora de pico. A taxa TOU é composta por dois blocos temporais, nomeadamente períodos de pico e períodos fora de pico de preço. Esta taxa tenta reflectir o custo médio de electricidade durante vários períodos;
2. ***Critical Peak Pricing (CPP)*** – representam taxas que incluem um tempo de uso de energia pré-especificado e são sobrepostas às taxas TOU ou às taxas fixas normais. As taxas CPP são usadas durante as contingências ou quando os preços no mercado grossista são elevados, para um número limitado de dias ou horas por ano;
3. ***Extreme Day Pricing Programs (EDPP)*** – são semelhantes às taxas CPP quanto ao elevado preço de electricidade, mas diferem destas pelo facto do preço apenas ser válido durante as 24 horas de um dia extremo. Este preço é conhecido com um dia de antecedência;

4. **Extreme Day CPP (ED-CPP)** – para as taxas do tipo ED-CPP, as taxas CPP referentes aos períodos de pico e fora de pico são executadas durante os dias extremos;
5. **Real Time Pricing (RTP)** – nos programas RTP os consumidores são cobrados à hora, pelas oscilações dos preços que indicam o custo real da electricidade no mercado grossista. Os consumidores que aderem a estes programas recebem informação dos preços com uma hora ou um dia de antecedência.

A Figura 2.5 apresenta a integração dos programas PAC na operação e planeamento de sistemas de energia num horizonte temporal, no contexto do MEE. Um recurso importante do lado da procura, que pode ser considerado de forma independente, mas não necessariamente excluída dos programas de PAC acima descritos, é a eficiência energética. A eficiência energética deve ser considerada no planeamento de longo tempo do sistema.

Contudo, os sistemas de preço em tempo real podem aumentar a conta de electricidade do consumidor final devido à volatilidade dos preços altos. Deste modo, os consumidores ou as empresas industriais podem evitar este problema através dos contratos bilaterais a longo prazo, e eliminar o risco de preço para uma quantidade fixa de energia (Gulich, 2010).



**Figura 2.5:** A integração dos programas PAC na operação e planeamento de sistemas de energia (USDE, 2006).

## 2.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as principais características dos MEE. No início do capítulo, realizou-se uma breve descrição da evolução dos mercados de energia, nomeadamente o processo de reestruturação do sector eléctrico, que possibilitou a passagem do modelo em regime de monopólio para o modelo de mercados de energia eléctrica liberalizados.

Apresentou-se de forma sucinta as características e o funcionamento das três estruturas de mercado: em bolsa ou *pool*, contratos bilaterais e mistos. De seguida, descreveu-se com mais detalhe os contratos bilaterais físicos, incluindo as suas vantagens e as limitações.

Salientou-se que com a liberalização do sector eléctrico foi possível separar as funções de geração de electricidade e retalho, dos monopólios naturais de transmissão e distribuição, levando à implementação de um mercado grossista e de um mercado retalhista.

Neste capítulo também se descreveu de forma breve o MIBEL, apresentando-se as principais alterações que levaram ao seu desenvolvimento. Indicou-se que o MIBEL centra-se numa bolsa gerida pelo OMI, o qual tem dois pólos: OMIE (pólo espanhol) e OMIP (pólo português). Foram descritas as características dos mercados referentes a cada pólo, incluindo-se também as funcionalidades de alguns dos intervenientes no Mercado Ibérico. Apresentaram-se ainda algumas características de interligação entre as redes de transporte de Espanha e Portugal, e fez-se referência ao conceito de mecanismo de separação de mercados (*market splitting*) no horizonte diário.

Por fim, abordou-se o tema da PAC em ambiente de mercado, apresentando-se a sua definição, importância e benefícios, bem como os tipos de programas existentes, que têm como propósito implementar várias modalidades de controlar o consumo de energia dos consumidores.



---

## Capítulo 3

# Sistemas Multi-Agente para Mercados de Energia

---

Este capítulo discute como a tecnologia baseada em Agentes e Sistemas Multi-Agente é vantajosa no contexto dos Mercados de Energia Eléctrica liberalizados. O capítulo inicia-se com a introdução dos conceitos de Agente e Sistemas Multi-Agente, realçando as suas principais características. Inclui-se também um modelo de negociação para Agentes autónomos e descrevem-se algumas plataformas de desenvolvimento de Sistemas Multi-Agente, dando especial destaque à plataforma JADE, aplicada no desenvolvimento do simulador SIMEPAC. O capítulo descreve ainda um Mercado de Energia Multi-Agente, constituídos por vários agentes autónomos. Por fim, são descritas algumas ferramentas de simulação de mercados de energia.

### 3.1 Introdução

Com o processo de reestruturação do sector eléctrico torna-se necessário compreender as complexas interações entre os vários participantes no Mercado de Energia Eléctrica (MEE). De modo a facilitar e ajudar a gerir a complexidade dos mercados eléctricos, em particular os mercados retalhistas, são utilizados agentes de *software* com competência de negociação, no sentido de providenciar a sustentabilidade a longo prazo.

A tecnologia baseada em agentes e Sistemas Multi-Agente (SMA) tem gerado muita atenção ultimamente, sendo um campo relativamente novo nas ciências da computação. O início da investigação dos SMA no seio da comunidade científica ocorreu nos anos 80. No entanto, só em meados dos anos 90 passou a adquirir uma grande importância em muitos aspectos da computação, tais como a Inteligência Artificial, Robótica e Engenharia de *Software*.

Em relação à presente dissertação, das várias áreas de aplicação dos SMA (como por exemplo, resolução de problemas, equipas de robôs e simulação social) a que possui mais interesse é a da simulação. Atendendo ao contexto do capítulo 2, nesta dissertação propõe-se a modelação do MEE liberalizado como um SMA, através de uma ferramenta de simulação multi-agente. Os participantes do mercado, nomeadamente os retalhistas e os consumidores finais, cada um com os seus objectivos e estratégias de actuação, são representados por agentes que negoceiam contratos bilaterais entre si.

Assim, neste capítulo, apresentam-se as noções de agente e SMA, algumas das suas principais características, um modelo de negociação, e algumas plataformas computacionais existentes para modelar e implementar SMA, dando especial atenção à ferramenta multi-agente JADE<sup>1</sup>, utilizada no desenvolvimento do simulador SIMEPAC.

### 3.2 Sistemas Multi-Agente

Os SMA consistem em sistemas compostos por múltiplos agentes que mostram um comportamento autónomo, mas que ao mesmo tempo têm uma componente social, interagindo uns com os outros (e possivelmente com seres humanos) para resolver um determinado problema ou objectivo. Nestes sistemas, os agentes não possuem geralmente um objectivo comum. Os seus interesses podem entrar em conflito com os interesses de outros agentes, tal como acontece nas sociedades humanas. Contudo, apesar da possibilidade de conflitos de interesses, os agentes necessitam frequentemente de cooperar de modo a atingirem os seus objectivos (Pereira, 2004).

De modo a que um agente consiga operar como parte de um SMA, torna-se necessário a existência de uma infra-estrutura que permita a comunicação e/ou interacção entre os agentes que o compõem. Como os SMA englobam vários agentes, cada agente possui

---

<sup>1</sup>JADE – *Java Agent DEvelopment Framework*, <http://jade.tilab.com> (JADE, 2011)



diferentes capacidades de percepção e acção no mundo, e cada um terá uma esfera de influência distinta sobre o ambiente, ou seja, será capaz de influenciar diferentes partes do ambiente.

Algumas das razões para o interesse crescente no desenvolvimento de SMA incluem a capacidade de solucionar problemas com dimensão elevada para um único agente (devido à limitação de recursos ou ao simples risco de ter um sistema centralizado), proporcionar soluções para a distribuição de problemas, permitir aumentar a velocidade de processamento, a fiabilidade, bem como fornecer soluções para situações em que o conhecimento é distribuído, entre outros.

Apesar dos SMA proporcionarem muitas vantagens, também levantam vários desafios, como por exemplo quanto ao processo de formular e expressar um dado problema, a comunicação e a interacção entre os agentes, a escolha de uma linguagem e de um protocolo adequado, bem como garantir que os agentes actuam de forma coerente na tomada de decisões ou na execução de acções.

Segundo Jennings et al. (1998), os SMA apresentam as seguintes características:

- Cada agente tem informação ou capacidade de resolução de problemas limitados, relativamente ao sistema global;
- Os dados são descentralizados;
- Não existe um controlo global do sistema;
- A computação é assíncrona.

Num SMA, os agentes que o compõem podem estar a trabalhar em conjunto para atingir um objectivo geral ou individualmente para atingir objectivos separados, que eventualmente podem estar relacionados, sendo desta forma necessária a interacção entre diferentes agentes. Estes sistemas são apropriados a problemas que têm vários métodos de resolução, várias perspectivas e/ou várias entidades.

### 3.2.1 Agentes Autónomos

O termo agente é utilizado em diversas áreas com diferentes significados, não existindo por isso um conceito único de agente. De facto, existem inúmeras definições de agente, sendo a seguinte considerada normalmente útil (Wooldridge, 1999):

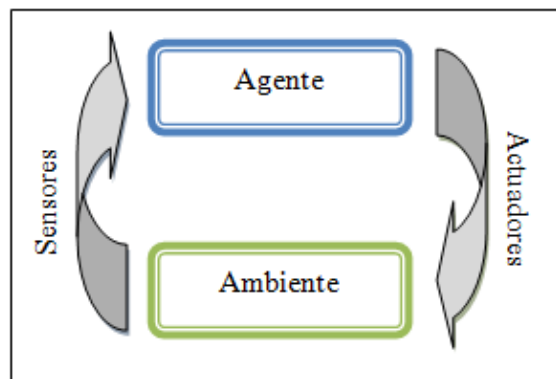
*“Um agente é uma entidade real ou abstracta capaz de agir sobre ela mesma e sobre o ambiente que a rodeia, e que dispõe de uma representação, ainda que parcial, desse ambiente. Num universo multi-agente, pode comunicar com outros agentes, resultando o seu comportamento das suas observações, conhecimento e interacções com outros agentes.”*

Em geral, os agentes são interpretados como entidades de *software* autónomas que actuam num determinado ambiente e interagem com outros agentes e com o próprio ambiente. Em termos genéricos, um agente envolve uma arquitectura e um programa (Russell e Norving, 2003). Cada agente é caracterizado através de algumas propriedades essenciais. A Figura 3.1 apresenta a interacção entre um agente autónomo e o ambiente onde este está inserido.

Wooldridge e Jennings, (1995) apresentam duas noções para o conceito de agente, uma “fraca” e outra “forte”, sendo que para a noção “fraca” os agentes possuem as seguintes características ou propriedades:

- *Autonomia* – os agentes devem tomar decisões ou acções importantes para a conclusão de objectivos sem a intervenção de seres humanos ou outros agentes. Ou seja, cada agente deve ser capaz de agir de forma independente no ambiente através dos seus sensores e actuar nesse meio através dos seus actuadores, com a intenção de realizar as tarefas propostas, devendo ser concebidos de modo a não bloquearem, mesmo quando ocorram falhas de informação;
- *Reactividade* – os agentes autónomos são capazes de perceber, responder e reagir de forma impulsiva às alterações no ambiente;
- *Pró-actividade* – capacidade dos agentes para tomar a iniciativa de modo a satisfazerem os seus objectivos;
- *Capacidade social* – capacidade de interagir com outros agentes e possivelmente com seres humanos através de uma linguagem de comunicação.

Alguns cientistas, especialmente os que trabalham com sistemas inteligentes, consideram também uma noção “forte” de agente. Neste caso, um agente é visto como uma entidade cognitiva e com consciência, capaz de exibir sentimentos, percepções e até emoções.



**Figura 3.1:** Um agente a actuar sobre o ambiente (Wooldridge, 1999).

É possível classificar os agentes de acordo com vários aspectos, como por exemplo, quanto à mobilidade:

- *Agentes móveis* – para estes agentes a mobilidade é a sua característica principal, sendo capazes de movimentarem-se entre ambientes distintos;
- *Agentes estacionários* – são agentes opostos aos móveis, sendo fixos num dado ambiente computacional.

Quanto ao seu comportamento, os agentes podem ser classificados de seguinte modo:

- *Agentes deliberativos* – memorizam a informação que percebem sobre o ambiente e sobre os outros agentes que os rodeiam;
- *Agentes reactivos* – reagem a estímulos sem possuir memória do que foi realizado no passado, nem previsão da acção a ser tomada no futuro. Não têm uma representação do ambiente ou de outros agentes e são incapazes de prever e antecipar acções;
- *Agentes híbridos* – combinam os dois modelos de agentes referidos, incluindo aspectos deliberativos e reactivos.

Os ambientes em que os agentes actuam podem ter diferentes características, sendo particularmente importantes as seguintes (Russell e Norving, 2003):

- *Acessíveis vs Inacessíveis* – um ambiente acessível é aquele em que um agente pode obter informação completa e precisa sobre o seu estado. A maioria dos ambientes complexos (por exemplo, a Internet e todos os ambientes físicos reais) são inacessíveis. Quanto mais acessível for o ambiente, mais simples é a criação de agentes para nele operarem;
- *Determinísticos vs Não Determinísticos* – um ambiente determinístico é aquele em que qualquer acção tem um único efeito garantido, não havendo incerteza sobre o estado que resultará da sua realização. Os ambientes não determinísticos apresentam maior complexidade;
- *Episódicos vs Sequenciais* – num ambiente episódico, o desempenho de um agente é dependente de um número de episódios discretos. Os ambientes episódicos são relativamente simples, porque um agente pode decidir que acção executar baseando-se apenas no episódio actual;
- *Estáticos vs Dinâmicos* – um ambiente estático é suposto permanecer inalterado enquanto um agente decide qual a próxima acção a executar. Em contraste, num ambiente dinâmico vários agentes encontram-se a agir sobre ele simultaneamente. Todos os ambientes físicos do mundo real e a Internet são dinâmicos;

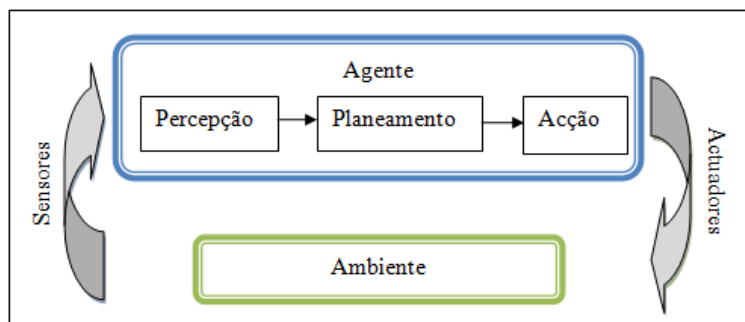
- *Discretos vs Contínuos* – num ambiente discreto existe um número finito de percepções e acções possíveis para cada agente. Um ambiente pode ser contínuo no que diz respeito às percepções de um agente e discreto no que diz respeito às suas acções (e vice versa).

A arquitectura de um agente determina a sua estrutura interna, definindo os módulos que estão envolvidos nas várias tarefas a realizar pelo agente e o modo como tais módulos interagem entre si. As principais categorias de arquitecturas de agentes são (Wooldridge, 1999): deliberativas, reactivas, híbridas e BDI, sendo estas apresentadas de seguida.

### 3.2.1.1 Arquitecturas Deliberativas

Em arquitecturas deliberativas, cada agente é caracterizado por possuir um modelo simbólico e explícito do ambiente e de outros agentes. As suas decisões são normalmente feitas através de raciocínio lógico. A Figura 3.2, apresenta a estrutura de uma arquitectura deliberativa.

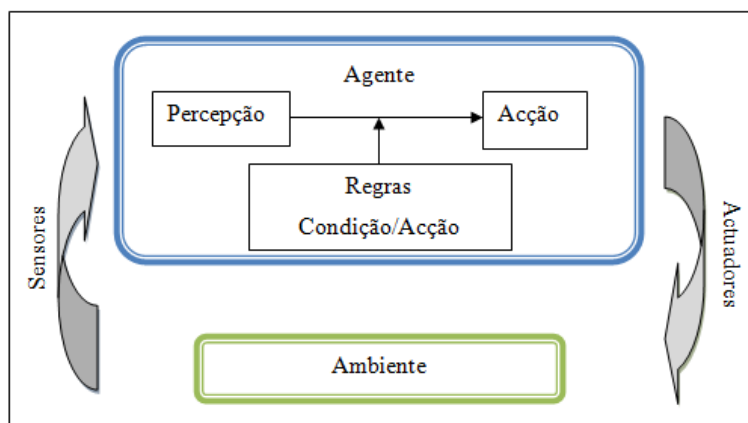
Este tipo de arquitecturas levanta alguns problemas, como a tradução do mundo real em descrições simbólicas adequadas e a forma de levar os agentes a raciocinar.



**Figura 3.2:** Estrutura de uma arquitectura deliberativa (Wooldridge, 1999).

### 3.2.1.2 Arquitecturas Reactivas

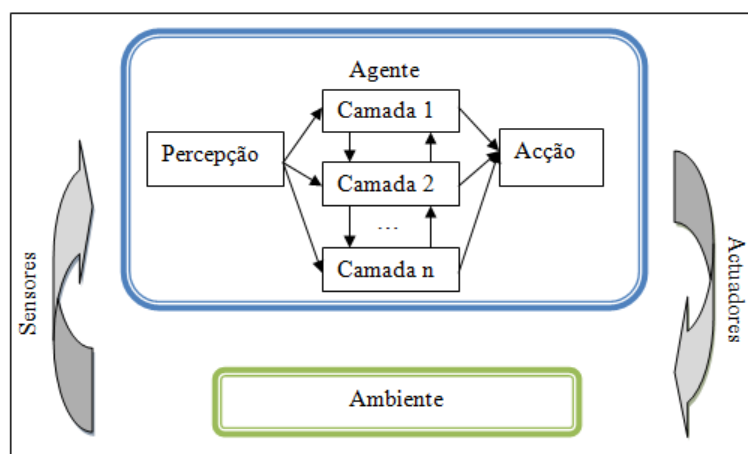
Em arquitecturas reactivas, cada agente reage a mudanças que ocorrem no ambiente ou a mensagens provenientes de outros agentes, utilizando um modelo de estímulo-resposta (como um autómato). O agente realiza as suas decisões com base num conjunto de regras simples de condição/acção. No fundo, reage a estímulos adoptando comportamentos. A Figura 3.3 apresenta a estrutura de uma arquitectura reactiva.



**Figura 3.3:** Estrutura de uma arquitectura reactiva (Wooldridge, 1999).

### 3.2.1.3 Arquitecturas Híbridas

As arquitecturas híbridas combinam os dois modelos de agentes referidos anteriormente, incorporando aspectos deliberativos e aspectos reactivos. Os agentes puramente reactivos têm uma limitação significativa, que consiste na dificuldade em implementar comportamento orientado por objectivos. Os agentes puramente deliberativos são baseados em mecanismos de raciocínio simbólico complexo e tornam-se, por vezes, incapazes de uma reacção imediata a um estímulo exterior. Um agente híbrido combina estas duas componentes, caracterizando-se por uma arquitectura composta por vários módulos ou camadas organizados tipicamente de forma hierárquica. A Figura 3.4 apresenta a estrutura típica de uma arquitectura híbrida.



**Figura 3.4:** Estrutura de uma arquitectura híbrida (Wooldridge, 1999).

#### 3.2.1.4 Arquitecturas BDI

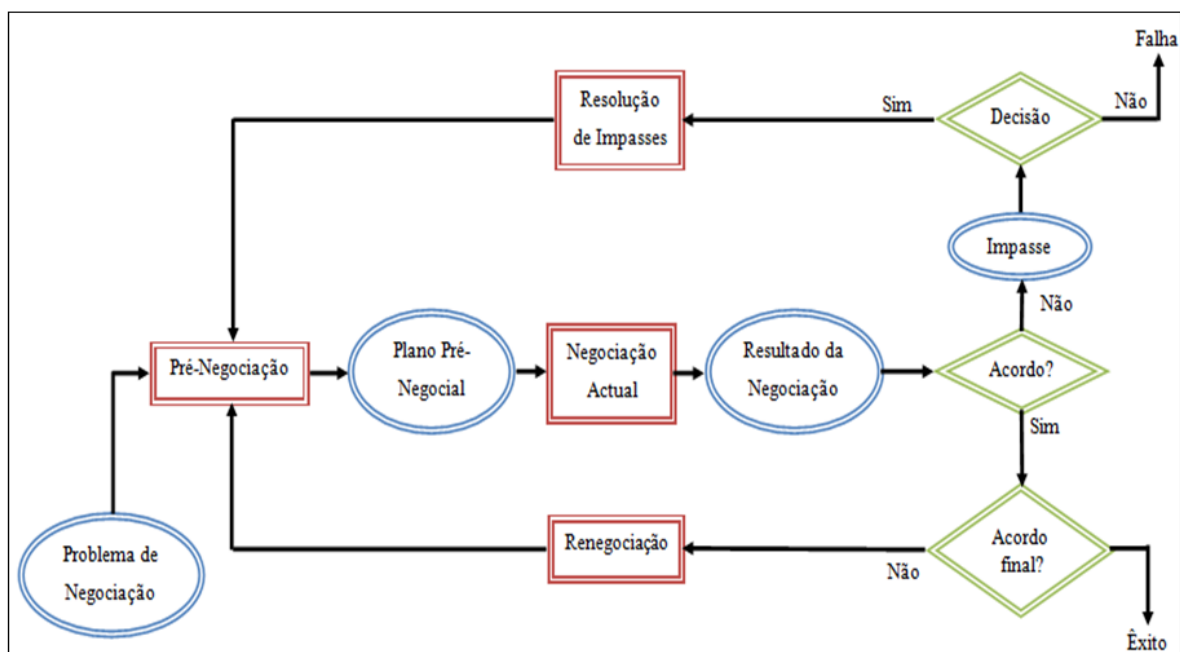
Os agentes BDI (*Beliefs, Desires, Intentions*) baseiam-se em três atitudes mentais distintas, nomeadamente:

1. Crenças (*Beliefs*) – as crenças referem-se ao que um agente acredita em cada instante e descrevem o estado do mundo do agente (o seu conhecimento sobre o ambiente);
2. Desejos (*Desires*) – os desejos referem-se ao que um agente deseja obter. No entanto, a forma de alcançar esses desejos pode não ser conhecida num dado instante. Os objectivos dos agentes resultam de um processo de raciocínio, que consiste numa escolha de um subconjunto dos desejos que são consistentes e atingíveis;
3. Intenções (*Intentions*) – as intenções referem-se a um conjunto de acções ou tarefas que um agente seleccionou, comprometendo-se na sua realização. As intenções devem ser consistentes internamente e representam o resultado de um processo de deliberação.

Um agente BDI possui normalmente uma biblioteca de planos pré-definidos, ou seja, um conjunto de procedimentos simples e sequenciais que permitem atingir os seus objectivos.

#### 3.2.2 Negociação entre Agentes Autónomos

A negociação é uma discussão entre duas ou mais partes com o objectivo de alcançarem um acordo sobre uma divergência de interesses. A lista de situações que podem ser resolvidas através de negociação é indeterminável. Algumas situações podem ser puramente competitivas, quando as partes envolvidas têm interesses completamente opostos. Outras situações podem ser puramente cooperativas, quando as partes têm os interesses perfeitamente compatíveis. A maioria das situações são do tipo misto, contendo elementos de ambas as situações (competitivas e cooperativas) — os interesses das partes são imperfeitamente correlacionados. Há, no entanto, várias características comuns à maioria das situações de negociação: (i) duas ou mais partes, (ii) um conflito entre as partes, ou seja, o que uma parte quer não é necessariamente o que as outras partes querem e (iii) uma preferência individual para encontrar um acordo, em vez de apelar a uma autoridade superior (Lopes e Coelho, 2010).



**Figura 3.5:** Esquema genérico do processo negocial (Lopes et al., 2010).

A negociação tradicional é normalmente realizada “cara a cara”, via telefone ou *e-mail*. Esta negociação torna-se por vezes difícil de controlar, podendo ser mal-interpretada e prolongada. De forma oposta, a negociação automática promete um maior nível de eficiência, e mais importante, uma emergência rápida, e uma maior qualidade de acordos. Actualmente, devido ao grande impacto monetário, surgiu uma procura crescente de sistemas compostos por agentes de *software* capazes de chegarem a acordos mutuamente benéficos.

A negociação pode prosseguir por várias fases ou etapas, sendo de realçar a fase inicial, a fase intermédia ou de resolução de problemas, e a fase final. A fase inicial foca-se na preparação e planeamento da negociação. Esta fase é marcada por esforços de cada uma das partes para enfatizar pontos de diferença e pela postura nas posições. A fase intermédia ou de resolução de problemas procura uma solução para uma disputa e é caracterizada por uma interacção interpessoal extensa, manobras estratégicas, e movimentos em direcção a um acordo mutuamente aceitável. A fase final concentra-se em detalhes e implementação de um acordo final. Estas fases motivaram o desenvolvimento do esquema genérico do processo negocial mostrado na Figura 3.5, sendo os principais processos os seguintes (Lopes e Coelho, 2010):

- Processo de pré-negociação;
- Processo de negociação;
- Processo de resolução de impasses;
- Processo de renegociação.

O **processo de pré-negociação** engloba as tarefas operacionais e estratégicas relativas à preparação e ao planeamento da negociação. Uma preparação eficaz envolve a criação de um plano bem elaborado. Nesta perspectiva, os negociadores devem realizar uma série de actividades antes da negociação, sendo de realçar:

1. Definir os itens da negociação e preparar a agenda negocial;
2. Atribuir prioridades e pesos aos itens de negociação;
3. Determinar os limites e as restrições negociais;
4. Definir um protocolo e seleccionar uma estratégia de negociação.

Os negociadores devem juntar todos os itens numa lista compreensiva de forma a estabelecerem posteriormente uma agenda negocial, com base no conjunto das listas de todos os negociadores envolvidos. De seguida, devem atribuir prioridades e pesos aos itens de negociação, por forma a determinarem quais os mais importantes e se estes são interligados ou separados.

Uma preparação e um planeamento eficazes exigem também que os negociadores definam dois aspectos principais para cada item, nomeadamente:

- *O ponto de resistência ou limite* – o ponto onde cada negociador decide parar a negociação, ao invés de continuar, porque qualquer acordo para além deste ponto não é minimamente aceitável;
- *O ponto desejável ou o nível de aspiração* – o ponto onde cada negociador espera realisticamente alcançar um acordo.

Para além disso, uma preparação e um planeamento eficazes impõem que toda a negociação deva envolver um protocolo apropriado, com regras específicas que regem a interacção entre os agentes. Um protocolo define os estados da negociação (por exemplo, aceitação de proposta), as acções válidas dos agentes em alguns estados particulares (por exemplo, que mensagem pode ser enviada e por quem, em que fase) e os eventos que causam mudanças de estados (por exemplo, proposta aceite). Existem vários tipos de protocolos que variam significativamente em função do tipo e da quantidade da informação trocada entre os agentes (ver a Subsecção 4.2.2) (Lopes et al., 2010).

As estratégias de negociação representam as decisões individuais dos agentes, enquanto que o protocolo de negociação ajuda a restringir as acções possíveis a realizar, não especificando qualquer acção particular. Assim, em cada etapa de negociação, os agentes precisam de usar estratégias para escolher entre as diferentes acções possíveis de executar (ver a Secção 4.3).



O **processo de negociação** é o processo central para atingir um acordo. A negociação consiste basicamente numa troca iterativa de propostas e contrapropostas que pode terminar num acordo (quando ambas as partes aceitam uma determinada oferta) ou num impasse (quando as partes não chegam a acordo). Um impasse pode ser definido como um estado da negociação, quando a situação usual não é aceitável. No entanto, se a situação for alterada de algum modo, os negociadores podem resolver um impasse e chegar a um acordo.

O **processo de renegociação** aborda a análise e o melhoramento de um acordo minimamente aceitável. Os negociadores são várias vezes confrontados com situações complexas de conflito onde acabam por aceitar resultados pouco benéficos. No entanto, a identificação de um acordo minimamente aceitável não significa necessariamente que o acordo seja eficiente, o que pode levar com que os negociadores possam reabrir alguns contratos e tentar uma nova negociação.

### 3.2.3 Plataformas Computacionais existentes para SMA

Existem várias plataformas computacionais que permitem simplificar o desenvolvimento de SMA, sendo algumas delas amplamente utilizadas. Estas plataformas fornecem uma infra-estrutura dentro da qual os agentes interagem e operam entre si. Apresenta-se de seguida, de forma breve, algumas plataformas desenvolvidas, como a OAA e o Repast, dando ênfase à plataforma de comunicação entre agentes JADE, visto ser a plataforma adoptada na presente dissertação. Para uma consulta mais detalhada das plataformas existentes ver a página *Web* de *Leigh Tesfatsion*<sup>2</sup>.

#### 3.2.3.1 JADE

O JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*)<sup>3</sup> é um plataforma computacional, implementado na linguagem JAVA, que possibilita o desenvolvimento de aplicações baseadas em agentes em conformidade com as especificações FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) para interoperabilidade<sup>4</sup> de SMA. O JADE é um *software* livre, em código fonte aberto sobre os termos da licença LGPL (*Library Gnu Public Licence*) e distribuído pela Telecom Itália, detentora dos direitos de autor. O primeiro desenvolvimento do *software* foi iniciado pela Telecom Itália em 1998, motivado pela necessidade de validar as especificações FIPA (Bellifemine et al., 2007).

As especificações FIPA descrevem: i) serviço de nomes, que indica a localização de um determinado agente, dado o seu nome, ii) serviço de páginas amarelas, onde um agente pode procurar outros agentes a partir do serviço que disponibilizam, e iii) todos os

<sup>2</sup><http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/acecode.htm>

<sup>3</sup><http://jade.tilab.com/>

<sup>4</sup>Entende-se como interoperabilidade a capacidade de um sistema informatizado comunicar de forma transparente com outro sistema.

aspectos que não fazem parte do agente em si e que são independentes das aplicações, tais como transporte, codificação e interpretação de mensagens, e ciclo de vida dos agentes.

O objectivo da plataforma JADE consiste em simplificar o desenvolvimento de SMA, assegurando o cumprimento das normas através de um conjunto abrangente de agentes. Para atingir este objectivo, o JADE oferece uma lista de recursos para a programação de SMA, entre os quais:

- *Plataforma distribuída de agentes* – uma plataforma que pode ser distribuída entre várias máquinas (desde que não exista nenhum *firewall*<sup>5</sup> entre eles);
- *Graphical User Interface (Gui)* – uma interface gráfica para gerir vários agentes;
- *FIPA-compliant Agent Platform* – inclui o *Agent Management System* (AMS)<sup>6</sup>, o *Directory Facilitator* (DF)<sup>7</sup> e o *Agent Communication Channel* (ACC)<sup>8</sup>. Estes componentes são automaticamente activados quando o ambiente é iniciado;
- *Ferramentas de Debugging* – ferramentas que ajudam o desenvolvimento e depuração de aplicações multi-agentes baseadas em JADE;
- *Transporte de mensagens* – troca mensagens no formato FIPA-ACL<sup>9</sup>.

Como referido anteriormente, a plataforma JADE foi totalmente desenvolvida e baseada na linguagem JAVA, devido às características particulares desta linguagem. A linguagem JAVA foi criada pela *Sun Microsystems* em 1995, com o objectivo inicial de ser utilizada em sistemas isolados, com uma quantidade mínima de memória. No entanto, com a expansão da Internet e da *World Wide Web*, a linguagem gerou um interesse maior, devido à possibilidade de criação de páginas *Web* com conteúdos dinâmicos (Savich, 2005). Actualmente, JAVA é uma das linguagens de programação mais utilizadas, tanto para criação de diversas aplicações como para programação de agentes, entre outros.

A plataforma JADE foi a plataforma multi-agente escolhida para o desenvolvimento da presente dissertação pelo facto de ser baseada em agentes, facilitar a gestão da comunicação entre estes, e permitir que os utilizadores humanos possam fazer parte da comunidade de agentes.

---

<sup>5</sup> *Firewall* é um dispositivo de uma rede de computadores que tem por objectivo aplicar uma política de segurança a um determinado ponto da rede.

<sup>6</sup> O AMS é o agente que executa o controlo da fiscalização sobre o acesso e a utilização da plataforma, é responsável pela autenticação dos agentes residentes e do controlo das inscrições.

<sup>7</sup> O DF é o agente que proporciona o serviço de páginas amarelas para a plataforma.

<sup>8</sup> O ACC é o agente que fornece o caminho para o contacto básico entre os agentes dentro e fora da plataforma, é o método de comunicação padrão que oferece um serviço de rotina seguro.

<sup>9</sup> FIPA-ACL – FIPA-*Agent Communication Language* – especifica uma linguagem de mensagem padrão, definindo a codificação das mensagens.

### 3.2.3.2 OAA

A plataforma OAA (*Open Agent Architecture*)<sup>10</sup> foi desenvolvida no Centro de Inteligência Artificial da SRI Internacional, sendo uma plataforma computacional que permite a construção de agentes utilizando a linguagem *InterAgent Communication Language* (ICL). A ICL é a linguagem de interface, comunicação e coordenação comum a todos os agentes desenvolvidos na OAA.

Na OAA, a figura central é um agente designado de *facilitator*, responsável por coordenar a comunicação e resolução cooperativa de problemas. A OAA está estruturada por forma a:

- Minimizar o esforço envolvido na criação de novos agentes e no encapsulamento de aplicações pré-existentes, escritas em diferentes linguagens e funcionando em diferentes plataformas;
- Encorajar a reutilização de agentes já existentes;
- Permitir o dinamismo e a flexibilidade na constituição de comunidades de agentes;
- Permitir incluir o utilizador como membro de uma comunidade de agentes.

Para a construção de agentes, a OAA fornece uma biblioteca disponível em várias linguagens de programação, como o C, C++ e o JAVA.

### 3.2.3.3 REPAST

O Repast (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*)<sup>11</sup> é uma plataforma de modelação de agentes que permite realizar simulações temporizadas e programadas de forma a observar e estudar a evolução de agentes, e dos ambientes onde actuam. As suas principais características incluem ambientes gráficos bastante elaborados que permitem a representação dos agentes no seu ambiente.

O Repast coloca a ênfase no comportamento social, mas não é limitado apenas aos aspectos sociais. Várias entidades têm utilizado esta ferramenta para desenvolver aplicações, que vão desde sistemas sociais, sistemas evolutivos, modelação de mercados, análise industrial, entre outros. No entanto, apesar do Repast suportar diversas características de simulação, falta-lhe porém a capacidade de distribuir agentes em diferentes computadores.

---

<sup>10</sup><http://www.ai.sri.com/oaa>

<sup>11</sup><http://repast.sourceforge.net>

### 3.3 Mercado de Energia Multi-Agente

O Mercado de Energia Eléctrica (MEE) é um mercado em que as entidades presentes são heterogéneas, tendo cada uma os seus objectivos e comportamento próprio. Devido à reestruturação do sector eléctrico ser recente e continuar em constante evolução, as características do mercado podem variar no decorrer do tempo, introduzindo novas entidades, novos regulamentos, entre outros. Assim, através da tecnologia multi-agente, é possível integrar facilmente as novas características, através da inserção de novos agentes ou da alteração das suas características, tais como objectivos, funções ou comportamentos, sem haver necessidade de reformular o sistema. Os agentes de *software*, ao representarem as entidades do MEE, detêm o conhecimento de cada entidade, bem como o modo como esta vê o mercado e as estratégias de actuação neste, sendo possível definir uma comunidade de agentes concorrentes, capazes de competirem e cooperarem, simulando o comportamento do mercado (Pereira, 2004).

As principais vantagens de utilização da tecnologia multi-agente em MEE são as seguintes:

- *Representação natural do domínio* – um SMA constitui uma abordagem ideal para modelar mercados de energia, nos quais a informação e o controlo são distribuídos por natureza;
- *Robustez* – a sobreposição de competências dos agentes individuais faz com que o sistema global seja mais tolerante a falhas;
- *Fiabilidade* – a sobreposição de conhecimento de diferentes agentes torna o sistema mais fiável;
- *Economia* – a reutilização do *software* existente é, em regra, mais barata do que o desenvolvimento de novos programas.

Para a presente dissertação, visto que o principal objectivo consiste em modelar um MEE liberalizado como um SMA, são abordados dois problemas inerentes à concepção e desenvolvimento de agentes autónomos, nomeadamente:

1. O problema de projecto – como formular e descrever um MEE liberalizado através de um conjunto de agentes autónomos?
2. O problema de coordenação – como garantir que os agentes actuam de forma coerente em tomar decisões ou acções, tendo em conta os seus objectivos (como por exemplo, para o caso do consumidor final, a minimização do seu custo, ou para o caso do agente retalhista, a maximização do seu benefício)?

Estes problemas serão descritos com mais detalhe nas Subsecções 3.3.2 e 3.3.3. Segue-se a descrição de algumas entidades existentes no MEE liberalizado.

### 3.3.1 Entidades do Mercado de Energia Eléctrica

Com a reorganização do sector eléctrico foi necessário realizar algumas modificações importantes, nomeadamente alterar as funções das entidades do sistema vertical, criando assim novas entidades. Os modelos de mercado e as entidades envolvidas variam nos diferentes países. No entanto, existe um conjunto de entidades comuns a esses modelos, por vezes com designações diferentes. A Figura 3.6 apresenta esquematicamente as principais actividades do sistema eléctrico.

Segundo Shahidehpour et al. (2002), as principais entidades existentes no mercado da energia eléctrica são as seguintes: operador de mercado, operador de sistema, entidades produtoras, entidades de transporte, entidades distribuidoras e as entidades comercializadoras de energia eléctrica.

#### Operador de Mercado

O Operador de Mercado (OM) é a entidade responsável pela administração do mercado de energia eléctrica em bolsa, recebendo as propostas de compra e venda de energia eléctrica por parte dos agentes autorizados a actuar no mercado, tais como produtores, comercializadores e consumidores finais. É o OM que define o preço da electricidade e as propostas aceites em cada período de negociação (Ferreira, 2007).

No MIBEL existem dois operadores de mercado, o OMIE (pólo espanhol), responsável pelos mercados diário e intradiário, e o OMIP (pólo português), responsável pelo mercado a prazo (referidos na Secção 2.4).

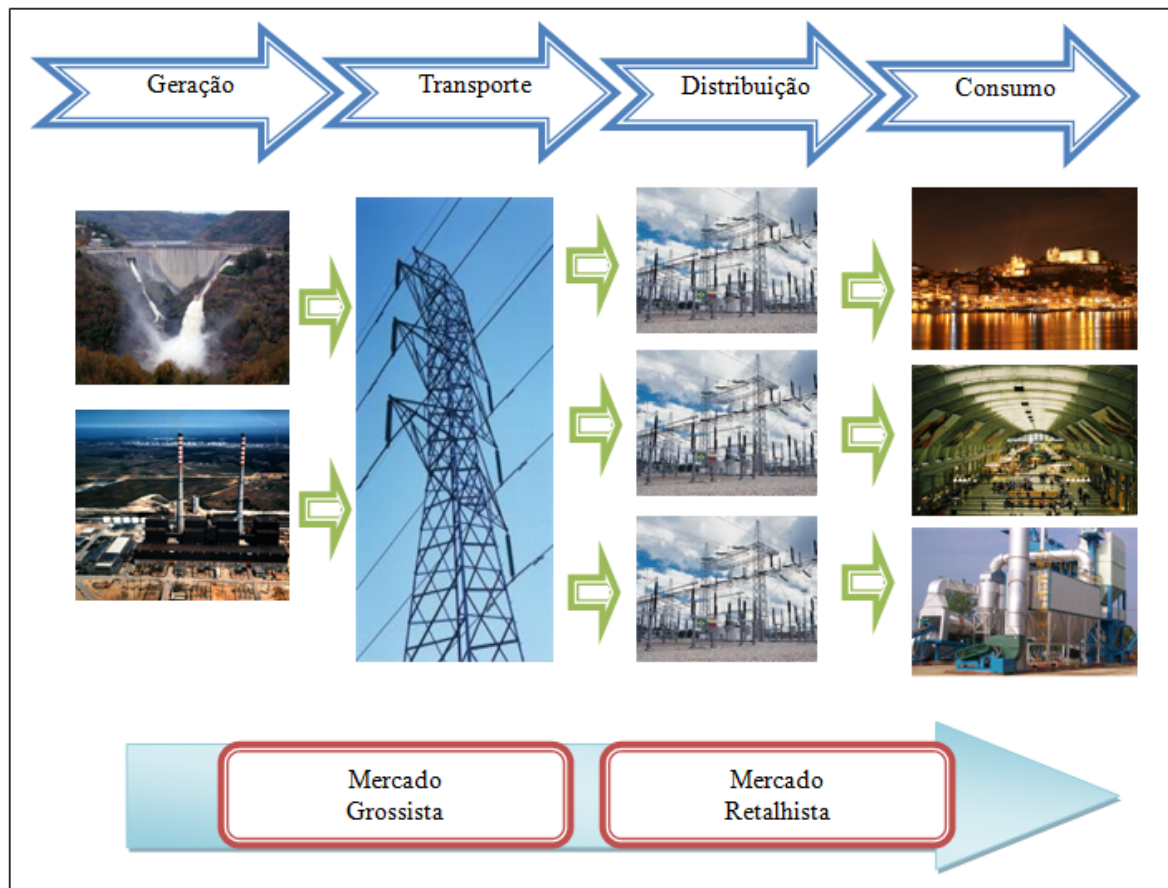
#### Operador de Sistema

O Operador de Sistema (OS) é a entidade cuja função é a coordenação técnica de operação do sistema de transporte, exploração e planificação das operações. Esta entidade administra o transporte e a distribuição numa determinada área e mantém a segurança do sistema eléctrico, tendo a responsabilidade de assegurar a capacidade a longo prazo do sistema para atender pedidos razoáveis de transmissão de distribuição de electricidade. É o OS que detém autoridade para gerir os recursos do sistema e para cortar cargas de forma a manter a sua segurança, sendo responsável por remover violações no transporte, equilibrar a oferta e a procura, e manter aceitável a frequência do sistema.

No MIBEL há dois operadores de sistema que exercem estas funções, nomeadamente a REN<sup>12</sup>, o operador de sistema português, e a REE<sup>13</sup>, o operador de sistema espanhol.

<sup>12</sup>REN – Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A.

<sup>13</sup>REE – *Red Eléctrica de España*



**Figura 3.6:** Sistema eléctrico e a competitividade do mercado de energia (Lopes et al., 2010).

### Entidades Produtoras

As entidades produtoras de electricidade são responsáveis pela produção/fornecimento de energia e têm a função de proporcionar ofertas de venda. Estas entidades podem ser empresas de produção independentes ou um conjunto de produtores, que têm como objectivo vender, maximizando os seus lucros e satisfazendo as necessidades dos consumidores. As entidades produtoras devem assegurar igualdade de tratamento a todos os outros participantes no mercado.

Em Portugal, os principais produtores de energia eléctrica são a Turbogás, a Tejo Energia e a CPPE<sup>14</sup>

<sup>14</sup>CPPE – Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade (EDP Produção). A CPPE integra uma sub-*holding* do Grupo EDP, que surgiu como uma necessidade de otimizar a eficiência e coordenação das várias centrais produtoras, e que inclui, além da CPPE (SEP), as seguintes empresas: a HDN, Hidrocenel e TER (na produção não vinculada); a Enova e a EDP Cogeração (Produção em regime especial); a EDP Produção EM, O&M Serviços, HidroEm, Tergen e Enepro na área dos serviços.

## **Entidades de Transporte**

As entidades de transporte têm o papel de construir, gerir, manter e operar o sistema de transmissão numa determinada área. As redes de transporte oferecem o serviço de transporte da energia eléctrica, desde os produtores até às redes de distribuição, sendo remuneradas através de tarifas. Estas entidades representam um sistema essencial nos mercados de energia eléctrica e não têm propriedade comum com outros participantes no mercado. Esta infra-estrutura é normalmente operada e gerida pelo OS em regime de monopólio (Pereira, 2011).

## **Entidades Distribuidoras**

As entidades distribuidoras de energia são responsáveis pela distribuição de energia eléctrica aos consumidores numa determinada área e têm a função de operação, manutenção, expansão e segurança da rede de distribuição aos consumidores finais. A actividade de distribuição manteve-se em regime de monopólio natural por razões económicas, operacionais e ambientais.

Em Portugal, a actividade de distribuição é realizada pela EDP Distribuição (empresa do grupo EDP) em regime de monopólio regulado.

## **Comercializadores**

Com a liberalização do sector, procedeu-se à separação das actividades de comercialização e distribuição, permitindo a entrada de novos agentes, e introduzindo a concorrência no sector, susceptível de aumentar a eficiência das empresas e gerar benefícios para os consumidores. Os comercializadores podem ser divididos em dois grupos, nomeadamente os grossistas, representados pelos produtores de energia, que comercializam no mercado grossista, e os retalhistas, que comercializam no mercado retalhista.

Os retalhistas compram a energia eléctrica do mercado grossista e vendem no mercado retalhista aos consumidores, devendo ter licença legal para vender electricidade a retalho. Estes podem lidar directamente com os consumidores finais ou indirectamente através de agregadores. Os retalhistas apenas desempenham a função de comercialização, sem capacidade de produção.

Os agregadores são entidades intermediárias que agregam um número de consumidores individuais e/ou pequenos ou médios geradores de energia num grupo coerente de participantes de negócio. Agrupando-se, os consumidores podem vir a usufruir de melhores condições, nomeadamente preços mais baixos, uma vez que necessitam de maiores quantidades de energia e podem dotar-se de meios, mais ou menos elaborados, para gerir as suas ofertas e as suas curvas de consumo. Estas entidades podem exercer a sua actividade como intermediários, entre consumidores e retalhistas, quando comprem energia para depois a revender aos seus clientes (Shahidehpour et al., 2002).

Em Portugal, as empresas de comercialização de electricidade responsáveis pela gestão das relações com os consumidores finais, incluindo a facturação e o serviço ao cliente, são a EDP Serviço Universal (que actua como Comercializador de Último Recurso do SEN, sendo actualmente o maior comercializador em Portugal), a EDP Comercial, a Endesa, a Iberdrola, a Unión Fenosa, entre outras.

### **Consumidores**

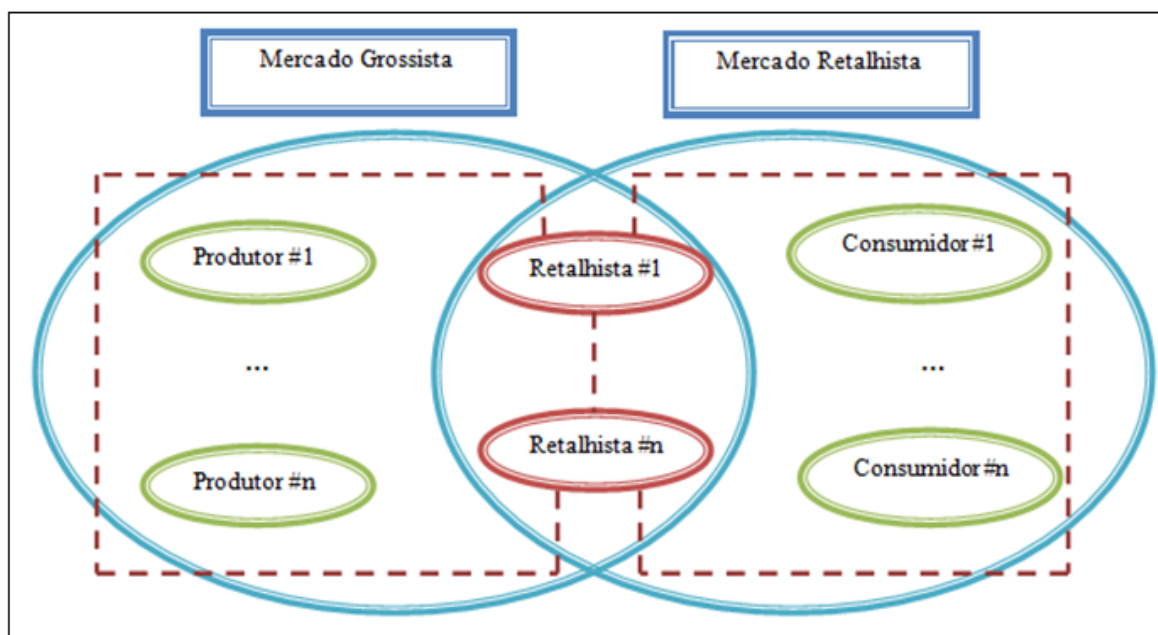
Os consumidores são utilizadores finais de electricidade ligados a uma rede de distribuição, caso sejam pequenos consumidores, ou a uma rede de transporte, caso sejam grandes consumidores, com potências elevadas ou necessidades especiais (por exemplo, consumidores industriais de área química, entre outros).

Numa estrutura verticalmente integrada, os consumidores obtinham energia eléctrica através de uma determinada entidade, com direitos legais para prestar este tipo de serviço. Actualmente, num sistema liberalizado, os consumidores não são obrigados a comprar energia a uma determinada entidade, tendo possibilidade de estabelecer contratos com os produtores de electricidade escolhidos. Os consumidores podem utilizar a flexibilidade das suas cargas, nomeadamente deslocando as suas cargas para fora das horas de elevado consumo, para escolher um fornecedor que ofereça preços mais baixos, podendo também escolher o pacote de serviços que melhor satisfaça as suas necessidades.

### **3.3.2 O Problema de Projecto**

O problema do projecto centra-se no domínio de aplicação que o sistema pretende resolver de forma distribuída, ou seja, um mercado de energia liberalizado, envolvendo um mercado grossista e um mercado retalhista. O mercado grossista tem a função de permitir transacções entre produtores e retalhistas, enquanto que o mercado retalhista permite transacções entre retalhistas e consumidores finais. A Figura 3.7 apresenta o esquema de um mercado de energia multi-agente.





**Figura 3.7:** Mercado de energia multi-agente (Lopes et al., 2010).

Os participantes do mercado são representados por três tipos de agentes, nomeadamente:

1. Geradores ou agentes produtores – representam empresas produtoras de energia a operar num mercado grossista, ou seja, transaccionam energia nesse mercado;
2. Comercializadores ou agentes comercializadores – representam os retalhistas de electricidade e operam nos mercados grossista e retalhista; compram energia no mercado grossista e vendem no mercado retalhista;
3. Consumidores finais – representam os consumidores e operam no mercado retalhista onde compram energia.

Neste trabalho, os requerimentos do problema do projecto são os seguintes:

- Os participantes do MEE, particularmente os retalhistas e os consumidores finais, deverão ter aptidão para entrar em contratos bilaterais físicos de forma a protegerem-se da volatilidade e incerteza dos preços;
- Os participantes do MEE deverão ser equipados com uma estrutura de negociação que lhes permita submeter propostas e contrapropostas para alcançarem acordos benéficos;
- Os participantes do MEE deverão ser capazes de exibir um comportamento estratégico. As estratégias de negociação irão definir a sequência de acções ao longo do processo de negociação de forma a determinar os valores das propostas e contrapropostas, nomeadamente preços e quantidades de energia.

### 3.3.3 O Problema de Coordenação

Os agentes de *software* autónomos que operam num mundo comum serão inevitavelmente confrontados com conflitos sociais, assim como acontece com os agentes humanos (Lopes et al., 2010). Deste modo, o problema de coordenação centra-se em garantir que os agentes agem de forma coordenada, a fim de atingirem seus objectivos individuais de forma efectiva.

Os conflitos podem ser solucionados através do processo de negociação (ver a Subsecção 3.2.2). No presente trabalho, o problema de coordenação é resolvido, pelo menos em parte, através da concepção de agentes que sejam capazes de coordenar as suas actividades através de negociação, com particular incidência para a negociação de contratos bilaterais.

### 3.3.4 Ferramentas de Simulação Multi-Agente de Mercados de Energia Eléctrica

A modelação de MEE com base em agentes de *software* é uma técnica em grande expansão, que tem visto uma série de aplicações práticas nos últimos anos. Os simuladores de MEE são basicamente imitações do mercado real, que têm como propósito avaliar, de forma económica, o comportamento e a estrutura de um sistema e/ou as decisões tomadas neste sistema (Harp et al., 2000). As ferramentas de simulação ganharam relevância após a liberalização, existindo actualmente diversos simuladores com aplicações no âmbito do mercado eléctrico (por exemplo, para planear investimentos, para analisar tipos de mercados, para analisar o congestionamento nas linhas de transmissão, etc.).

Através de ferramentas de simulação baseadas em agentes é possível representar as diversas entidades presentes nos MEE, com diferentes objectivos e comportamentos, interagindo de variadas formas, tendo em conta as diferentes modalidades de negociação considerados no sector eléctrico. A simulação multi-agente permite não só analisar o comportamento do mercado como um todo, mas também o comportamento individual das várias entidades envolvidas, e a forma como este pode influenciar ou ser influenciado pelo mercado.

De seguida, são apresentados alguns simuladores multi-agente de MEE, nomeadamente o MASCEM, EMCAS, SEPIA, SCBE e SMEE, descrevendo-se as suas principais características. Estas ferramentas destacam-se por serem ferramentas que possuem características semelhantes ao do simulador desenvolvido no presente trabalho.

Existem também vários simuladores comerciais desenvolvidos para apoiar a tomada de decisão e que realizam uma validação mais detalhada sobre os programas de Participação Activa dos Consumidores (PAC), que não são baseados em agentes. Geralmente, o *software* existente tem por objectivo avaliar as oportunidades de redução de custos com base na construção e caracterização da carga (HVAC, ventilação, iluminação, etc.),

como por exemplo o simulador DOE<sup>15</sup>, actualizado para uma nova versão DOE-2, que inclui uma ligação para *MATLAB/Simulink*, que integra a lógica de controlo (USDE, 2012).

Um outro simulador de PAC é o DemSi, que permite realizar estudos de acções e sistemas do lado da procura, usando simulações realistas de redes com base em PS-CAD<sup>16</sup>. O DemSi permite simular o uso de diversos programas de PAC, considerando os diversos participantes envolventes (fornecedores, retalhistas e consumidores de energia) nas acções de PAC, podendo os resultados obtidos serem analisados do ponto de vista de cada participante (Faria, 2011). Estes simuladores aconselham normalmente os utilizadores sobre os melhores tipos de programas de PAC, para cada contexto específico (referidos na Subsecção 2.5.4).

### 3.3.4.1 MASCEM

O *Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets* (MASCEM) é um simulador multi-agente que simula o MEE competitivo. Esta ferramenta foi criada no GECAD<sup>17</sup>, do Instituto Superior de Engenharia do Porto. O MASCEM usa técnicas sofisticadas de Inteligência Artificial que servem de base para a modelação de agentes, é flexível e possui uma abordagem aberta que suporta uma diversidade de modelos de mercados. O simulador é desenvolvido através da plataforma OAA (referido na Subsubsecção 3.2.3.2) com base na linguagem de programação JAVA (Vale et al., 2009).

Neste simulador, os mercados considerados são o mercado *pool* e o mercado de contratos bilaterais. Os agentes dizem respeito a um facilitador, produtores, um operador de mercado (OM), consumidores, retalhistas e um operador de sistema (OS). Estes agentes podem definir os seus próprios objectivos e regras de decisão, bem como adaptar as suas estratégias com base no sucesso ou fracasso anteriores. O facilitador tem a função de coordenar e monitorizar as simulações do mercado de energia, garantindo o seu bom funcionamento. O OM executa a função de pedir as licitações do mercado, recebendo as ofertas de venda e compra, determinando os preços de mercado de compensação, e por fim, decidindo se as propostas recebidas são aceites ou recusadas. Nos contractos bilaterais, os termos dos contratos são negociados directamente entre os produtores e os retalhistas. Contudo, as propostas aceites no mercado *pool* e nos contatos bilaterais têm de ser enviadas ao OS, para verificação da capacidade da rede de transporte ((Zhou et al., 2009), (Praça et al., 2003)).

<sup>15</sup>DOE – *U.S. Department of Energy Program*

<sup>16</sup>PSCAD é um *software* de simulação desenvolvido pela *Manitoba-HVDC*, dedicado ao projecto e análise de sistemas de potência, fornecendo resultados rápidos e precisos através de uma interface gráfica. Pode ser encontrado em [www.pscad.com](http://www.pscad.com).

<sup>17</sup>GECAD – Grupo de Investigação de Engenharia de Conhecimento e Apoio a Decisão

É de salientar que o MASCEM também suporta agentes do lado da procura, que podem ter um papel activo nos MEE. São considerados dois tipos de acções para estes agentes:

- Participação em transacções de energia, negociando na *pool* e nos contratos bilaterais;
- Participação em programas de PAC.

Este simulador inclui um conjunto de ferramentas que permitem negociar o fornecimento do lado da procura, de acordo com as necessidades técnicas das redes de distribuição. Uma solução óptima é normalmente determinada através da minimização do custo global (Vale et al., 2009).

### 3.3.4.2 EMCAS

O *Electric Market Complex Adapted System* (EMCAS) foi desenvolvido pelo Centro de Energia, Ambiente e Sistemas de Análise Económica do *Argonne National Lab* (ANL). O simulador foi implementado através da plataforma Repast (referida na Subsecção 3.2.3.3), projectado para investigar e reestruturar o MEE, bem como compreender as implicações da concorrência sobre o preço da electricidade e a segurança técnica da rede eléctrica (Zhou et al., 2009).

Os participantes do mercado modelados pelo EMCAS incluem o OS, produtores, consumidores, a entidade de distribuição, a entidade de transmissão e o regulador. Os agentes podem definir os seus próprios objectivos e aplicar as suas regras de decisão. Além disso, podem aprender com a experiência adaptando o seu comportamento quando surgem novas oportunidades. Por outras palavras, podem adaptar as suas estratégias com base no sucesso ou falha anteriores. Os algoritmos genéticos são utilizados para dotar os agentes com capacidades de aprendizagem.

Com este simulador é possível representar vários mercados, tais como o mercado *pool* e contratos bilaterais, tendo em conta a congestão das linhas de transmissão. Os agentes licitadores podem explorar diversas estratégias de licitação disponíveis.

### 3.3.4.3 SEPIA

O *Simulator for the Electric Power Industry Agents* (SEPIA) foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia de Honeywell e pela Universidade de Minnesota. É uma ferramenta específica para MEE cujo objectivo consiste em analisar o comportamento dos participantes do sistema e o seu impacto no mercado. As principais componentes físicas modeladas no SEPIA são: empresas de produção, entidades consumidoras de energia e o operador de transporte.

As entidades consumidoras desempenham a função de fornecer perfis de carga dos consumidores, ou seja, providenciarem uma agenda global de consumo, bem como interagirem com as empresas produtoras para configuração de contratos bilaterais, e posteriormente receberem ofertas que incluem preços e quantidades de energia. Nos contratos bilaterais, antes da conclusão de um acordo, cada entidade consumidora ou produtora pode consultar o *Open Access Same-Time Information System* (OASIS) para transmissão de informação. Uma vez que estes contratos são realizados com as entidades consumidoras, cada empresa de produção envia a solicitação de transmissão correspondente ao operador de transporte para aprovação, recebendo de volta as agendas aprovadas. O operador de transporte recolhe as agendas e determina os horários de transmissão final, verificando também os critérios de segurança do sistema (Zhou et al., 2009).

Os agentes SEPIA são constituídos por várias camadas. Além disso, os agentes que representam as entidades produtoras possuem um módulo adaptativo, com componente de aprendizagem baseado no algoritmo *Q-learning*, que lhes permite explorar estratégias alternativas de definição de preços (Harp et al., 2000).

#### 3.3.4.4 SCBE e SMEE

Os Simuladores de Contratos Bilaterais de Electricidade (SCBE) e de Mercado de Energia (SMEE) foram desenvolvidos no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) em colaboração com o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Estas ferramentas multi-agente permitem simular a contratação bilateral de energia em MEE e foram desenvolvidas utilizando a plataforma JADE (Subsubsecção 3.2.3.1), e a linguagem de programação JAVA.

No SCBE, os agentes participantes no mercado são os retalhistas e os consumidores de energia eléctrica. Esta ferramenta permite auxiliar os agentes na análise e experimentação de várias técnicas de negociação, de modo a verificar quais as que se adequam melhor aos objectivos que se pretendem atingir. O SCBE permite simular a negociação entre agentes de electricidade sobre diferentes preços de tarifas do tipo DSM (Gestão de Procura de Energia) (Pereira, 2011).

O SMEE foi desenvolvido com o objectivo de apoiar os agentes, particularmente os retalhistas e os consumidores finais de energia eléctrica, no suporte à decisão, através da análise do comportamento dos agentes no mercado. Os agentes têm a possibilidade de escolher entre três estratégias de negociação e verificar qual a mais adequada em determinadas situações (Rodrigues, 2011).

Estes simuladores serviram de base ao desenvolvimento do simulador SIMEPAC, realizado no âmbito do presente trabalho.

### 3.3.4.5 Comparação entre as Ferramentas de Simulação Multi-Agente de Mercados de Energia Eléctrica

A Tabela 3.1 resume as principais características das ferramentas de simulação multi-agente descritas nesta secção e efectua a sua análise comparativa. Nesta tabela, apresentam-se também as particularidades do simulador SIMEPAC, efectuando-se a sua comparação com os restantes simuladores.

Da análise da Tabela 3.1, e tendo em conta o modelo de mercado suportado pelos simuladores, destaca-se o MASCEM e o EMCAS, pois incluem os dois tipos de mercado, *pool* e mercado de contratos bilaterais, permitindo ao utilizador escolher e analisar a melhor forma de negociar em cada um deles. Para o caso do MASCEM, estes mercados podem funcionar em separado ou em conjunto. Em relação aos tipos de agentes, constata-se que todos os simuladores são constituídos por agentes que assumem papéis importantes no MEE. Verifica-se que alguns dos simuladores possibilitam implementar agentes de *software* com capacidade de aprendizagem, o que permite o ajustamento das suas estratégias. Em relação à PAC, apenas o MASCEM integra acções do lado da procura por parte dos consumidores finais. Por fim, a rede de transporte indica quais os simuladores que têm em conta o congestionamento das linhas de transporte de energia na operação do mercado.

Desta análise constata-se que as ferramentas MASCEM e EMCAS são semelhantes. No entanto, existe uma diferença importante, que consiste no MASCEM possibilitar o estudo dos cenários do sistema, com o apoio de informação anterior, o que permite aos agentes adaptarem as suas estratégias de acordo com as características da situação presente. O MASCEM é também o simulador mais relacionado com o simulador SIMEPAC (com excepção dos SCBE e SMEE, visto que o SIMEPAC foi realizado com base nestes), principalmente por incluir acções de PAC.

Tabela 3.1: Características das ferramentas multi-agente de MEE analisados.

Características	MASCEM	EMCAS	SEPIA	SCBE e SMEE	SIMEPAC
Modelos de Mercado	<i>Pool</i> e Contratos Bilaterais	<i>Pool</i> e Contratos Bilaterais	Contratos Bilaterais	Contratos Bilaterais	Contratos Bilaterais
Tipos de Agentes	Comercializadores; Compradores; OM; OS.	Produtores; OS; Consumidores; Entidade de Transporte; Reguladores; Distribuidores.	Produtores; Consumidores; Oper. Rede de Transp; Gerador último recuso.	Consumidores; Retalhistas.	Consumidores; Retalhistas.
Aprendizagem	No comportamento do sistema	Algoritmos Genéticos	<i>Q-learning</i> nos agentes produtores	—	—
Tipos de Estratégias	Estratégias de Mercado( <i>Pool</i> e Contratação Bilateral)	Estratégias de Mercado	Estratégia de Negociação (Contratação Bilateral)	Estratégia de Negociação (Contratação Bilateral)	Estratégia de Negociação (Contratação Bilateral)
Participação Activa dos Consumidores	Suporta agentes do lado da procura, com acção em transacções de energia e em programas de PAC	—	Os agentes fornecem perfis de carga, mas não suportam acções de PAC	O SCBE negocia tarifas DMS, mas os simuladores não suportam acções de PAC	Os agentes suportam uma estratégia de negociação com PAC
Rede de Transporte	Localizações incluídas, mas análise de rede não	Incluída, mas simplificada em algumas zonas	Incluída, mas simplificada em zonas	—	—

### 3.4 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma descrição do mercado de energia multi-agente. Iniciou-se o capítulo com a apresentação das noções de agentes e SMA, salientando-se as principais vantagens de utilização da tecnologia multi-agente. Descreveram-se também as plataformas computacionais existentes, destacando-se a plataforma JADE. Posteriormente, destacaram-se os aspectos principais de negociação entre os agentes de *software* autónomos, realçando as principais fases de negociação, nomeadamente a pré-negociação, a negociação actual, e a renegociação.

Constatou-se que a tecnologia multi-agente aplicada ao MEE traz vantagens, tais como a representação natural do domínio, robustez, fiabilidade e economia.

De seguida, no contexto do mercado de energia multi-agente, foram identificados e abordados dois problemas inerentes à concepção e desenvolvimento de agentes autónomos, nomeadamente o problema de projecto e o problema de coordenação. Além disso, foram apresentadas de forma resumida as entidades presentes no MEE, descrevendo-se as suas funções.

Por fim, foram apresentadas algumas ferramentas de simulação multi-agente de MEE já existentes, evidenciando-se o MASCEM, EMCAS, SEPIA, SCBE e SMEE, em relação aos quais foi feita uma análise comparativa das suas principais características.



---

## Capítulo 4

# Negociação de Contratos Bilaterais com Participação Activa dos Consumidores

---

Este capítulo descreve o processo de negociação bilateral entre um agente retalhista e um consumidor final de energia eléctrica. O capítulo inicia-se com uma abordagem à Negociação dos Contratos Bilaterais e descreve alguns aspectos inerentes ao processo negocial. Inclui-se o Planeamento e a Preparação da Negociação e descreve-se um Protocolo de Ofertas Alternadas. Descrevem-se também as Estratégias de Negociação que os agentes podem utilizar durante a negociação. Por fim, o capítulo apresenta um enquadramento dos Contratos Bilaterais em Portugal.

## 4.1 Introdução

A globalização da economia mundial, com o consequente aumento da concorrência, ditou que vários sectores económicos fossem alvo de uma reestruturação que permitisse às empresas adaptarem-se à nova realidade, tornando-as mais competitivas e flexíveis a alterações do mercado. Neste sentido, e devido à importância primordial que a energia eléctrica detém na economia mundial, o sector eléctrico foi alvo de atenção por parte dos governantes, que sentiram a necessidade de o reestruturar para tornar as suas economias mais competitivas. Contudo, importa referir que o sector de energia eléctrica não possui características semelhantes à de outros sectores da economia tradicional, possuindo características e regras muito específicas (Azevedo, 2002).

Por conseguinte, devido à crescente complexidade e imprevisibilidade da evolução do mercado, torna-se cada vez mais difícil a tomada de decisões. Deste modo, as entidades intervenientes vêm-se forçadas a repensar o seu comportamento e as suas estratégias de mercado.

Tradicionalmente, as decisões estratégicas de operação do sistema energético eram realizadas por um pequeno número de participantes no Mercado de Energia Eléctrica (MEE), baseando-se principalmente no fornecimento e nos recursos de rede. No entanto, as mudanças recentes do sector eléctrico têm vindo a provar que o lado da procura também pode ter uma influência relevante sobre todo o processo, principalmente quanto à tomada de decisões estratégicas por parte dos consumidores. Neste novo paradigma, os consumidores finais e os compradores de energia podem desempenhar um papel muito mais activo no MEE, através de estratégias adequadas para atingir os seus objectivos.

No entanto, as entidades do MEE são heterogéneas e autónomas, tendo os seus próprios objectivos e seguindo as suas estratégias de negociação (por exemplo, as empresas produtoras visam adoptar estratégias que maximizam o seu lucro, enquanto que os consumidores de energia recorrem a estratégias que minimizam o seu custo). Desta forma, as estratégias têm como principal objectivo atingir acordos favoráveis entre os agentes intervenientes. Em termos práticos, pretende-se preparar propostas sucessivas por forma a finalizar uma negociação com sucesso (Rodrigues, 2011).

As estratégias podem ser aplicadas a qualquer tipo de mercado de electricidade, tal como o mercado *pool*, mercado de contratos bilaterais, mercado misto, etc. No mercado *pool*, as ofertas de venda são associadas a volumes de energia propostas pelas empresas produtoras e os consumidores finais têm em conta as suas estimativas de consumo. Neste tipo de mercado, os preços estabelecidos entre produtores e consumidores podem ser muito voláteis. Desta forma, cada vez mais os produtores e os consumidores começaram a recorrer a contratos bilaterais, que possibilitam fixar o preço de venda e compra de energia eléctrica para períodos futuros, definidos no processo de negociação.

A negociação bilateral é essencialmente um processo de tomada de decisão conjunta entre dois negociadores, onde duas partes acordam mutuamente os detalhes (preços, volumes, qualidade, local de entrega e data) de uma transacção cujo pagamento e entrega do bem só se efectuará num futuro próximo, sendo o preço fixado à partida, eliminando assim o risco inerente à sua variação.

Nesta perspectiva, este capítulo apresenta a descrição do processo típico de uma negociação bilateral, incluindo o planeamento e a preparação da negociação, e realçando a identificação dos principais itens a serem negociados, o protocolo, e as estratégias de negociação. Posteriormente, são descritas as duas estratégias desenvolvidas no âmbito do presente trabalho: “Gestão de Preço” (referente ao agente retalhista) e “Gestão de Volume” (referente ao consumidor final de energia).

## 4.2 Negociação de Contratos Bilaterais

Com a abertura da competitividade no sector eléctrico, o preço e a procura de electricidade variam em diferentes estações do ano, meses, dias do mês e horas do dia, na medida em que existem preços diferentes para diferentes condições. Além disso, existem regras distintas baseadas em diferentes modelos de negociação. Alguns dos modelos de negociação existentes incluem o modelo de negociação em mercado *pool*, em mercado de contratos bilaterais e misto.

A negociação em si é um processo através do qual duas (negociação bilateral) ou mais partes (negociação multilateral) tentam resolver conflitos por forma a alcançarem acordos mutuamente benéficos. A negociação bilateral é muito comum e ocorre, normalmente, entre um vendedor e um comprador. A negociação multilateral é menos comum mas ocorre, por exemplo, entre os membros do conselho de administração de uma empresa, com vista à obtenção de um acordo sobre orçamentos (Lopes, 2004).

Neste trabalho, foi adoptado o modelo de negociação entre duas partes, nomeadamente entre um vendedor e um comprador de energia eléctrica, em um mercado de contratos bilaterais. Os contratos bilaterais são financeiramente mais seguros para os participantes do mercado, porque garantem uma protecção contra as volatilidades dos preços elevados. Num contrato bilateral, tanto o vendedor como o comprador devem estar satisfeitos com os preços acordados e com as quantidades de energia comercializadas. Este tipo de negociação mostra-se ser economicamente mais eficiente em relação a outros modelos.

A negociação envolve a determinação de um contrato sob certos termos e condições, nomeadamente, determinação dos preços e das quantidades de energia. A contratação é executada a longo prazo, num período de seis meses, sendo os preços de energia eléctrica negociados para este período de tempo. A negociação é iterativa, podendo ocorrer várias trocas de propostas e contrapropostas antes de se chegar a um acordo.

Tipicamente, os agentes consumidores de energia eléctrica procuram vendedores que podem fornecer-lhes tarifários de energia com os melhores preços. No entanto, atendendo ao facto do presente trabalho estar relacionado com a eficiência energética, principalmente com a Participação Activa dos Consumidores (PAC), os consumidores de energia podem propor um perfil de carga de forma a conseguirem negociar preços de energia adequados ao seu consumo.

Para a implementação deste trabalho, os agentes envolventes, nomeadamente um agente retalhista e um consumidor final de energia, realizam uma apresentação prévia das suas propostas iniciais. Desta forma, o agente retalhista envia uma mensagem com a publicitação dos seus preços e o consumidor final com o seu perfil de carga.

É de salientar que à medida que a negociação decorre, o agente vendedor que não esteja satisfeito terá que baixar o preço pretendido, ao contrário do agente comprador, que, no caso de não estar a ser bem sucedido, terá que subir o preço a que pretende comprar a energia eléctrica.

#### **4.2.1 Planeamento e Preparação da Negociação**

Muitos negociadores humanos concordam num aspecto fundamental: a chave do sucesso na negociação consiste no planeamento e na preparação (pré-negociação). O planeamento deve ser encarado com flexibilidade, de modo a não limitar a espontaneidade dos negociadores e, sobretudo, não os bloquear face a posições imprevistas dos adversários (Lopes, 2004). Assim, atendendo ao contexto da Subsecção 3.2.2, o planeamento e a preparação da negociação envolvem a criação de um plano bem definido, por forma a ter êxito na negociação. Este plano inclui as seguintes tarefas:

- Identificar os itens da negociação;
- Atribuir prioridades aos itens de negociação;
- Determinar os limites;
- Definir um protocolo adequado;
- Identificar as estratégias de negociação.

Os agentes vendedor e comprador são os principais intervenientes no mercado, por isso dedica-se-lhe especial atenção, particularmente aos seus objectivos de negócio e às estratégias para alcançá-los. Assim, seja  $Ag_v$  o agente vendedor e  $Ag_c$  o agente comprador final de energia. Cada agente identifica os seus itens de negociação, sendo no caso presente os preços e volumes de energia.

A atribuição de prioridades aos itens tem como principal objectivo identificar, de forma clara, os itens de maior e de menor importância. Neste trabalho, as prioridades

são indirectamente atribuídas através dos volumes de energia do agente  $Ag_c$  e dos preços de energia do agente  $Ag_v$ , ou seja, os preços e volumes de energia mais elevados apresentam uma importância maior. Os itens de negociação têm, em regra, importâncias distintas. Neste caso, como os agentes ajustam as suas propostas em função das ofertas recebidas (para o caso do agente  $Ag_v$ , este aceita a oferta de volumes de energia recebida e adapta a sua proposta a enviar, e para o caso do agente  $Ag_c$ , a proposta a enviar é ajustada em função dos preços recebidos) considerou-se que a importância dos itens é igual para ambos os agentes.

Posteriormente, são definidos os limites de negociação. Os limites representam uma posição definitiva de retirada, um valor a partir do qual um negociador não está disposto a efectuar qualquer negociação (Lopes, 2004). Assim, considera-se o seguinte intervalo de limites para o agente  $Ag_v$ :

$$[P_{i_{min}}^v, P_{i_{max}}^v], \quad i = 1..6$$

Este intervalo indica a escala de preços negociáveis, sendo:

$P_{i_{min}}^v$  – o preço mínimo do agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ , e a partir do qual este prefere abandonar a negociação a alcançar um acordo;

$P_{i_{max}}^v$  – o preço máximo do agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ , também considerado como sendo o preço inicial da proposta publicada (preço óptimo do retalhista).

O agente  $Ag_c$ , para além da escala de preços negociáveis, considera também um intervalo de volumes:

$$[P_{i_{min}}^c, P_{i_{max}}^c], \quad i = 1..6$$

$$[V_{i_{min}}^c, V_{i_{max}}^c], \quad i = 1..6$$

sendo:

$P_{i_{min}}^c$  – o preço mínimo do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ , também considerado como sendo o preço inicial da proposta (preços óptimos do consumidor final);

$P_{i_{max}}^c$  – o preço máximo do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ , ou seja até onde este agente está disposto a negociar;

$V_{i_{min}}^c$  – o volume mínimo do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$V_{i_{max}}^c$  – o volume máximo do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ .

O planeamento também requer que os negociadores concordem com um protocolo adequado e seleccionem uma estratégia eficaz. Apresenta-se de seguida a descrição do protocolo e das estratégias de negociação.

### 4.2.2 Protocolo de Ofertas Alternadas

Um protocolo é um conjunto de regras que definem as formas possíveis como o processo de negociação pode decorrer, especificando quais as acções permitidas e quando são permitidas. Em termos específicos, o protocolo define os estados da negociação (por exemplo, aceitar proposta), as acções validas dos agentes em cada proposta (por exemplo, para quem e quando devem ser enviadas determinadas mensagens), e as ocorrências que causam a mudança de um estado para outro (por exemplo, a aceitação de uma proposta).

O protocolo pode ser mais ou menos sofisticado, dependendo do tipo e da quantidade de informação utilizada pelos negociadores. O protocolo poder ser simples, permitindo aos agentes trocar apenas propostas. Em alternativa, pode ser complexo, permitindo aos agentes providenciarem argumentos que apoiem a sua posição de negociação (Lopes et al., 2010). Para o simulador SIMEPAC (ver a Secção 5.2), visto este ser baseado num simulador já existente, manteve-se o protocolo de ofertas alternadas, que é o mais conhecido para a negociação bilateral.

O protocolo de ofertas alternadas modela a troca iterativa de propostas e contrapropostas, até os agentes alcançarem um acordo ou um dos agentes decidir abandonar a negociação. No protocolo, um dos agentes,  $Ag_v$  ou  $Ag_c$ , começa por oferecer valores para os parâmetros da negociação (preços de energia para o caso do  $Ag_v$ , ou volumes e preços de energia para o  $Ag_c$ ), ao seu opositor, iniciando o processo negocial. O opositor pode:

- Aceitar a proposta;
- Submeter uma contraproposta;
- Sair da negociação.

Se uma contraproposta é submetida, o processo é repetido até que um dos agentes a aceite ou abandone a negociação. Considera-se um conjunto  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ ,  $n \in N$ , de períodos temporais. Os agentes trocam propostas alternadamente, com um dos agentes a submeter propostas nos períodos ímpares  $\{t_1, t_3, t_5, \dots\}$  e o outro nos períodos pares  $\{t_2, t_4, t_6, \dots\}$ . É de salientar que para os casos de estudo descritos no capítulo 5, o número das propostas de negociação é limitado, tendo sido adaptado um número máximo de 7 propostas. A parametrização do número de propostas teve em conta os processos negociais reais típicos.

Apresenta-se de seguida a descrição do protocolo de ofertas alternadas através de um diagrama de estados e segundo o modelo da FIPA.

#### 4.2.2.1 Descrição por Diagrama de Estados

O protocolo é descrito por um conjunto de estados admissíveis para a negociação. É de salientar que neste trabalho foi considerado um estado pré-inicial de apresentação dos agentes, por forma a estes interagirem antes do início da negociação. Qualquer dos agentes pode iniciar a negociação. Optou-se por incluir o estado de apresentação na descrição do protocolo para uma melhor compreensão do processo negocial. A descrição dos estados é referente apenas a um dos agentes,  $Ag_v$  ou  $Ag_c$ , sendo o processo idêntico para ambos. Assim, os estados são os seguintes:

- Estado *pré-inicial* ou de *Apresentação*: representa o estado em que os agentes  $Ag_v$  e  $Ag_c$  realizam uma apresentação mútua, com troca de informação;
- Estado 0 ou *Verificação de "Request"*: representa o estado de verificação de existência de um pedido de inicialização do protocolo de negociação do opositor, ou seja, um agente verifica se recebeu uma mensagem do tipo *"Request"*;
- Estado 1 ou *Aceitação de "Request"*: representa o estado em que um agente ao receber a mensagem do tipo *"Request"*, do opositor, envia em resposta uma mensagem de aceitação de inicialização do protocolo de negociação;
- Estado 2 ou *Espera de Proposta*: representa o estado em que um agente espera pela proposta do opositor;
- Estado 3 ou *Análise de Proposta*: representa o estado em que um agente analisa a proposta recebida do opositor;
- Estado 4 ou *Acordo*: representa o estado em que um agente envia uma mensagem de aceitação da proposta do opositor (os agentes chegam a um acordo quando uma proposta é aceite pelas duas partes);
- Estado 5 ou *Contraproposta*: representa o estado em que um agente envia uma contraproposta ao opositor;
- Estado 6 ou *Fim da Negociação*: representa o estado em que é enviada uma mensagem de fim da negociação;
- Estado 7 ou *Pedido de "Request"*: representa o estado em que um agente envia um pedido de inicialização do protocolo de negociação, ou seja, envia uma mensagem do tipo *"Request"*;
- Estado 8 ou *Resposta a "Request"*: representa o estado em que um agente aguarda a resposta do pedido de aceitação do protocolo de negociação do opositor;

- Estado 9 ou *Proposta Inicial*: representa o estado em que um agente envia a proposta inicial ao opositor;
- Estado 10 ou *Final*: o protocolo termina, fechando-se a negociação.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de estados do protocolo de ofertas alternadas. O círculo preto representa a fase inicial do processo de negociação, por onde deve começar a leitura do diagrama. Os rectângulos de cantos arredondados representam os estados possíveis do protocolo. As transições de um estado para outro são representadas por setas.

O Estado *pré-inicial* permite aos agentes  $Ag_v$  e  $Ag_c$  tomarem conhecimento dos dados iniciais (preços e volumes) antes do início da negociação. No Estado 0, o agente verifica se recebeu uma mensagem do opositor do tipo “*Request*”. Em caso afirmativo, o protocolo transita para o Estado 1. Caso não seja recebida nenhuma mensagem, o protocolo transita para o Estado 7.

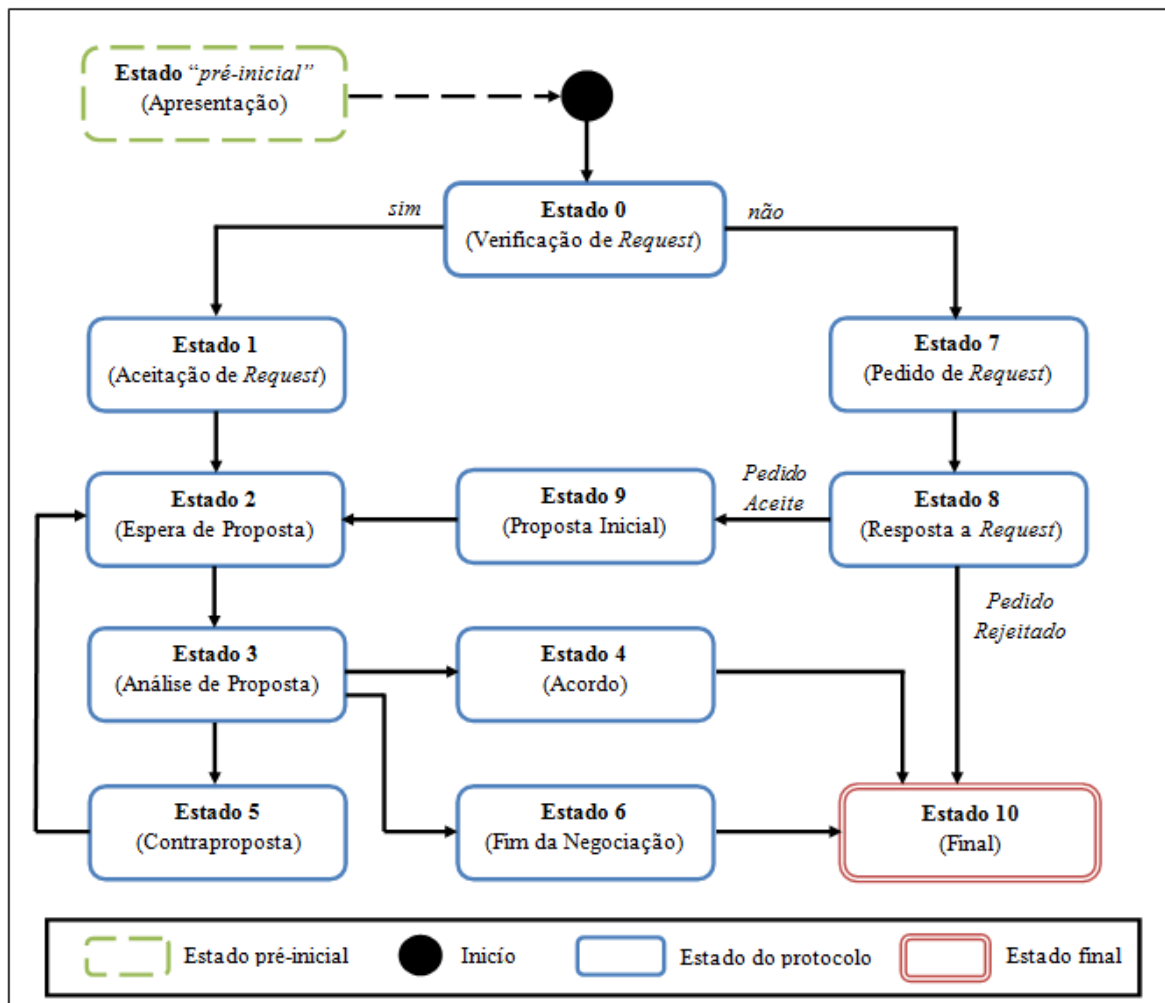


Figura 4.1: Diagrama de estados do protocolo de ofertas alternadas.



No Estado 1, o agente envia uma mensagem ao opositor com resposta de aceitação do “*Request*”, inicializando-se a negociação. O protocolo transita para o Estado 2, onde o agente fica a aguardar uma proposta do opositor. Recebida a proposta do opositor, o protocolo transita para o Estado 3. Neste estado, o agente analisa a proposta recebida e decide entre as três opções possíveis, qual a mais adequada a tomar. Caso o agente opte pela primeira opção, ou seja, aceitar a proposta, obtêm-se um acordo. Neste caso, não é enviada uma contraproposta e a negociação transita para o Estado 4. A segunda opção permite ao agente enviar uma contraproposta, caso este não aceite a proposta recebida. Nesta opção, o protocolo transita para o Estado 5. Na ultima opção, o agente não concorda com a proposta recebida e decide abandonar a negociação. Neste caso, os agentes não obtêm um acordo e o protocolo transita para o Estado 6.

A negociação transita para o estado Estado 6 quando não é obtido um acordo entre os agentes, sendo enviada uma mensagem de fim de negociação, transitando para o Estado 10. Os agentes terminam a negociação quando ocorrer um dos dois casos seguintes: (i) quando os limites mínimos (ou máximos) de um agente são ultrapassados, e por esta razão o agente decide abandonar a negociação, ou então, (ii) quando o número máximo das propostas da negociação for ultrapassado.

O protocolo transita para o Estado 4 quando for obtido um acordo entre os agentes. Desta forma, os agentes comprometem-se com os valores dos itens no acordo final, transitando para o Estado 10. No Estado 5, o agente opta por enviar uma contraproposta ao opositor, continuando a negociação.

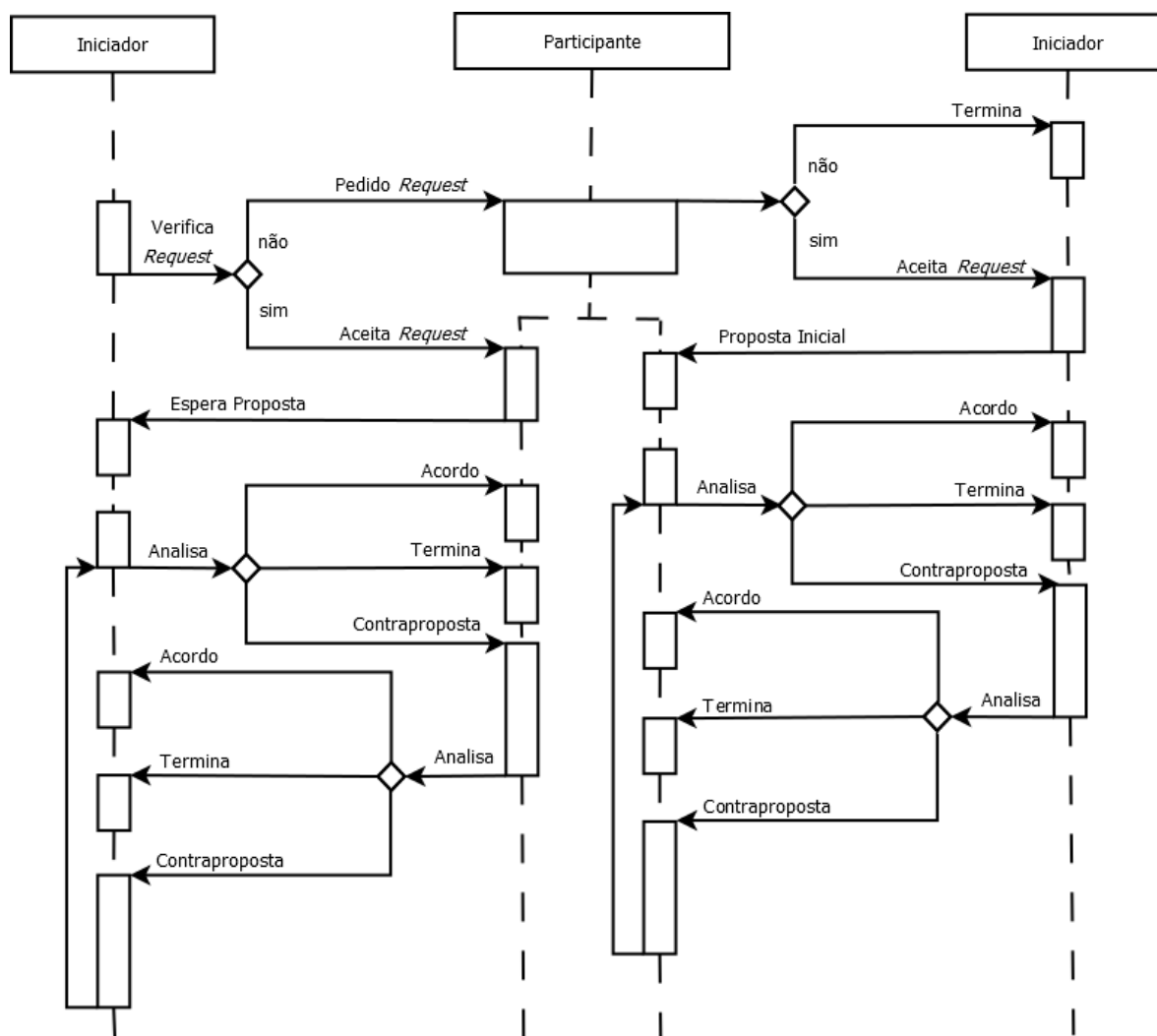
O protocolo transita para o Estado 7 se o agente não receber uma mensagem do tipo “*Request*”. Neste caso, é enviada uma mensagem com o pedido de inicialização do protocolo ao opositor. No Estado 8, o agente aguarda por uma resposta de aceitação de inicialização do protocolo. Se for aceite o pedido, o protocolo transita para o Estado 9. Caso contrário, transita para o Estado 10. No Estado 9, o agente envia uma proposta inicial ao opositor. O Estado 10 representa o estado final do protocolo.

#### 4.2.2.2 Descrição segundo o modelo da FIPA

Existem pelo menos duas motivações para usar a semântica FIPA - ACL<sup>1</sup>. A primeira consiste em desenvolver agentes que satisfaçam plenamente a semântica FIPA, tornando-os intrinsecamente mais flexíveis e abertos. A segunda motivação passa por beneficiar da manipulação intrínseca dos agentes desenvolvidos (Bellifemine et al., 2007).

---

<sup>1</sup>FIPA -ACL (FIPA-*Agent Communication Language*) – especifica uma linguagem de comunicação padrão, definindo a codificação das mensagens.



**Figura 4.2:** Diagrama do protocolo de ofertas alternadas segundo o modelo da FIPA.

A Figura 4.2 apresenta o diagrama FIPA do protocolo de ofertas alternadas. O protocolo é iniciado quando um dos agentes (iniciador) receber uma mensagem do tipo “*Request*” do opositor (participante). Neste caso, são distinguidos dois caminhos: (a) o iniciador recebeu uma mensagem do tipo “*Request*”, ou então, (b) o iniciador não recebeu uma mensagem do tipo “*Request*”.

Seguindo o caminho (a), o iniciador envia uma mensagem de aceitação do “*Request*”, inicializando o processo de negociação, e aguardando em seguida pela proposta do participante. Posteriormente, o iniciador analisa a proposta recebida e escolhe uma das seguintes opções: (i) aceita a proposta recebida, (ii) termina a negociação, ou (iii) envia uma contraproposta ao participante. Se o iniciador optar por enviar uma contraproposta, o participante recebe-a e pode optar por uma das seguintes opções: (i) aceita a proposta recebida, (ii) termina a negociação, ou (iii) envia uma contraproposta ao iniciador.

No caminho (b), é o iniciador que envia uma mensagem do tipo “*Request*” ao participante e posteriormente espera por uma mensagem de aceitação do pedido de inicialização do protocolo. O participante tem a opção de: (i) aceitar a mensagem do tipo “*Request*”, ou (ii) rejeitar a mensagem do tipo “*Request*”. Caso a mensagem seja rejeitada, termina a negociação. Se o iniciador receber a mensagem de aceitação do *Request*, o participante irá receber a primeira proposta. Posteriormente, o participante analisa a proposta recebida e escolhe uma das seguintes opções: (i) aceita a proposta recebida, (ii) termina a negociação, ou (iii) envia uma contraproposta ao iniciador. Se o participante optar por enviar uma contraproposta, o iniciador recebe-a e pode optar por uma das seguintes opções: (i) aceita a proposta recebida, (ii) termina a negociação, ou (iii) envia uma contraproposta ao participante.

Os agentes, iniciador e participante, trocam propostas e contrapropostas até atingirem um acordo ou um dos agentes terminar a negociação.

### 4.3 Estratégias de Negociação

Num mercado de electricidade competitivo, onde existe um ambiente de incerteza, torna-se cada vez mais necessário adoptar estratégias de negociação que visam a maximização do benefício e minimização do custo. Por forma a assegurar a eficiência e a estabilidade dos mercados, é importante compreender as interações estratégicas entre os intervenientes. Uma estratégia de negociação determina de que forma um agente prepara e/ou aceita propostas e contrapropostas, ou abandona a negociação. Uma estratégia pode ser definida como um conjunto de acções que definem o comportamento possível de um agente em cada situação que possa surgir durante a negociação (Giunta e Gatti 2007).

Em certos casos, o comportamento negocial dos participantes do mercado eléctrico pode ser modelado através da Teoria dos Jogos. Dado um protocolo, a Teoria dos Jogos sugere que os agentes devem aplicar estratégias que estejam em equilíbrio. Um conjunto de estratégias constitui um equilíbrio de Nash, se a escolha de cada agente for óptima, dada a escolha do agente concorrente (Rodrigues, 2011). Contudo, o problema da procura de estratégias em equilíbrio é normalmente complexo, não sendo por esta razão considerado na presente dissertação.

Como alternativa aos modelos baseados em Teoria dos Jogos, surgem os modelos baseados em Aproximações Heurísticas. Nestes modelos, considera-se que existe um custo associado à computação e tomada de decisão, e o espaço de negociação é explorado de uma forma não exaustiva, tendo como efeito a obtenção de soluções razoáveis em vez de óptimas (Pereira, 2004). As principais vantagens destes modelos são:

- o facto de serem baseados em pré-requisitos realistas, permitindo uma base mais adequada à automatização e a sua aplicabilidade a um maior número de domínios;
- o facto de permitirem o desenvolvimento de arquitecturas de agentes, por parte de quem não está familiarizado com a Teoria de Jogos, usando modelos de racionalidade alternativos e com menos restrições.

A ideia central destes modelos consiste em representar a tomada de decisão dos agentes, durante o processo de negociação, através de heurísticas.

As estratégias de negociação permitem criar uma variedade de comportamentos e podem levar a obter resultados negociais distintos, sendo de realçar:

- *Estratégias de concessão* – os negociadores reduzem as suas aspirações para adaptar-se, totalmente ou parcialmente, aos negociadores oponentes;
- *Estratégias de resolução de problemas* – os negociadores mantêm as suas aspirações e tentam conciliá-las com as aspirações dos opositores, ou seja, trabalham com o fim de atingirem um acordo integrativo que proporcione benefícios elevados para ambas as partes.

A estratégias de resolução de problemas visam encontrar acordos que apelem a todas as partes. São de realçar as seguintes estratégias:

- *“Logrolling”* – as duas partes concordam em trocar concessões entre os itens, de modo a que cada parte conceda nos itens de baixa prioridade para ele próprio e alta prioridade para o opositor;
- *Compensação* – cada negociador obtém os seus objectivos e permite ao opositor alcançar os seus interesses.

Neste trabalho, as estratégias visam descrever o comportamento dos agentes vendedor e comprador de energia. De notar, que estes agentes têm uma estrutura semelhante, mas interesses e preferências opostas. Deste modo, foram desenvolvidas duas estratégias distintas, que permitem a cada agente alcançar os seus objectivos. Assim, o agente retalhista é dotado de um comportamento estratégico que permite maximizar o seu benefício, enquanto que o consumidor final de energia é dotado de um comportamento estratégico que possibilita minimizar o seu custo, através de acções de PAC (ver Subsecções 4.3.1 e 4.3.2).

Após a formulação dos problemas de optimização para cada agente, as estratégias envolvem o seguinte:

**Agente Retalhista:**

- determinar o conjunto de preços de energia que maximizam o benefício, ou seja, através de uma procura exaustiva das diferentes propostas, tendo em conta as várias soluções possíveis, encontrar os preços para os quais o benefício é máximo. Neste caso, o benefício é máximo quando este for igual ao benefício definido, ou estiver compreendido num intervalo de valores próximos ao do benefício definido;
- definir um critério de escolha da solução óptima. Foram considerados dois critérios: distância vectorial e máximo benefício;
- avaliar as propostas recebidas, de forma a decidir sobre a sua aceitação ou recusa, recorrendo, para tal, a uma função de Benefício.

**Consumidor final:**

- determinar o conjunto de volumes de energia que minimizam o custo, ou seja, através de uma procura exaustiva das diferentes propostas, tendo em conta as várias soluções possíveis, encontrar os volumes para os quais o custo é mínimo. Neste caso, são procuradas todas as soluções cuja soma de volumes se mantém igual à soma dos volumes da proposta inicial, ou num intervalo de valores próximos à soma de volumes da proposta inicial;
- definir um critério de escolha da solução óptima. Foi considerado o critério do custo mínimo;
- determinar o conjunto de preços de energia a serem negociados;
- avaliar as propostas recebidas, de forma a decidir sobre a sua aceitação ou recusa, recorrendo, para tal, a uma função de Custo.

De seguida, são apresentadas as estratégias de negociação de cada agente, especificando-se os respectivos problemas de optimização. Os itens referidos acima serão descritos com mais detalhe no capítulo seguinte (ver a Subsubsecção 5.2.2.1).

### 4.3.1 Estratégia do Agente Retalhista: Gestão de Preço

A estratégia do agente retalhista, denominada por “Gestão de Preço”, tem como objectivo maximizar o benefício deste agente. A gestão de preços é realizada com base na oferta de energia por parte do consumidor final, ou seja, com base nos volumes de energia.

A estratégia tem por base um problema de optimização, que envolve a maximização de uma função Benefício (do agente retalhista), incluindo os preços de energia propostos pelo agente  $Ag_v$ , os volumes de energia propostos pelo agente  $Ag_c$ , e o custo de produção. A formulação matemática do problema de optimização é dada por (4.1), (4.2) e (4.3).

$$\text{Maximizar Benefício} = \sum_{i=1}^6 (P_i^v - C_i) \times V_i^c \quad (4.1)$$

*Sujeito a :*

$$P_i^v \geq C_i \quad (4.2)$$

O custo de produção é dado pela seguinte expressão:

$$C_i = P_{i_{min}}^v \quad (4.3)$$

O significado das variáveis das expressões (4.1), (4.2) e (4.3) é o seguinte:

*Benefício* – representa o benefício do agente  $Ag_v$ ;

$P_i^v$  – representa o preço do agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ ;

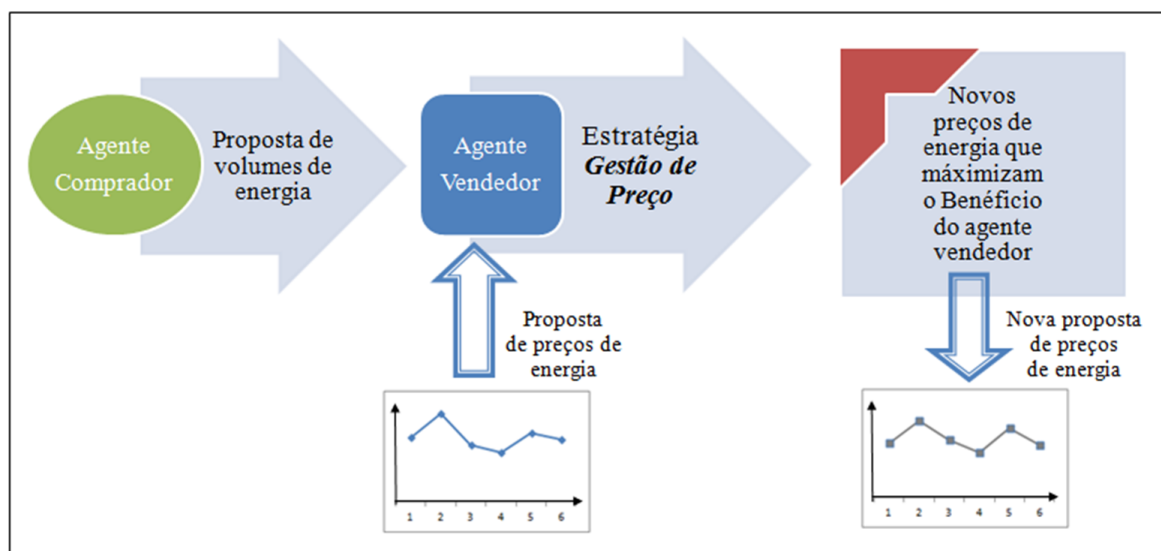
$V_i^c$  – representa o volume do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$C_i$  – representa o custo da produção, para o período  $i$ ;

$P_{i_{min}}^v$  – representa o preço mínimo do agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ .

A restrição expressa por (4.2) tem como objectivo garantir que o custo de produção dado pela equação (4.3) não ultrapasse os preços de energia do agente  $Ag_v$ .

O agente  $Ag_v$  aceita as propostas de volumes de energia do agente  $Ag_c$ , tentando através da estratégia de “Gestão de Preço” efectuar a gestão dos seus preços de energia conforme a proposta de volumes do opositor. A Figura 4.3 apresenta um esquema simplificado da aplicação da estratégia.



**Figura 4.3:** Esquema simplificado da aplicação da estratégia de “Gestão de Preço”.

### 4.3.2 Estratégia do Consumidor: Gestão de Volume

A estratégia do consumidor, denominada de “Gestão de Volume”, foi desenvolvida com o objectivo de possibilitar aos consumidores finais de energia terem uma participação mais activa no MEE. Esta estratégia tem como objectivo minimizar o custo de energia dos consumidores finais através de acções de PAC. Assim, através deste tipo de acções, os consumidores podem realizar a gestão do seu consumo de energia em resposta a preços elevados, para diferentes períodos do dia.

De uma forma geral, a PAC refere-se à participação dos consumidores de retalho nos MEE e é vista como uma resposta, por parte destes, às variações de preços de energia eléctrica ao longo do tempo. Da perspectiva do sistema eléctrico como um todo, a ênfase da PAC é colocada nas reduções da utilização de energia eléctrica nos horários críticos<sup>2</sup>. A PAC também pode resultar em incrementos no uso de energia eléctrica durante a maioria dos períodos, quando os preços são inferiores à média. Isso também resulta num uso mais eficiente do sistema eléctrico e pode promover o crescimento económico. A PAC representa o resultado de acções realizadas pelos consumidores de electricidade em resposta a estímulos e tipicamente envolve mudanças no seu comportamento. No entanto, o seu valor para a sociedade é derivado dos impactos cumulativos sobre todo o sistema eléctrico.

A PAC pode ser realizada através de uma taxa de electricidade de retalho incluída na factura de electricidade, que reflecte a variação de custos, ou através de um programa específico, visto como uma tentativa de induzir os consumidores finais a alterarem os

<sup>2</sup>Os horários críticos ocorrem normalmente algumas horas por ano, quando os preços de energia eléctrica no mercado grossista são muito elevados ou quando as margens de reserva são baixas devido a diversas contingências, tais como interrupções de geradores, danificação de linhas de transmissão, ou condições climáticas severas.

seus perfis de consumo, e que fornece um incentivo para reduzir a carga de energia em momentos críticos. Neste caso, o incentivo não está relacionado com o preço normal pago pela energia eléctrica (por exemplo, um valor complementar), e pode envolver pagamentos por reduções de carga de energia, penalidades pela não redução de carga ou ambos (USDE, 2006). No entanto, os incentivos e as penalidades por incumprimento não serão discutidos na presente dissertação, sendo um possível tópico para trabalho futuro.

Para além dos programas de PAC referidos na Subsecção 2.5.4, a reposta dos consumidores finais aos preços elevados também pode ser alcançada através das três acções apresentadas abaixo. Cada uma destas acções envolve custos e medidas a tomar pelo consumidor (USDE, 2006).

1. Os consumidores podem reduzir o consumo de energia eléctrica durante o período crítico, quando os preços são elevados, sem alterar o padrão de consumo durante as restantes horas. Esta opção envolve um desconforto temporário durante o período crítico;
2. Os consumidores podem responder aos preços de pico de energia eléctrica transferindo algumas actividades (que envolvam o consumo de energia) para os períodos fora das horas de pico (por exemplo, transferir algumas actividades domésticas, como funcionamento de máquinas de lavar louça, entre outros). No entanto, esta acção não irá trazer proveito aos consumidores industriais, pois neste caso terão que remarcar o funcionamento de alguns equipamentos necessários à produção;
3. A resposta do consumidor é realizada através do uso da geração local (produtor independente). Os consumidores que produzem a sua própria energia podem ou não enfrentar alguma mudança no padrão do seu consumo. No entanto, na perspectiva dos produtores de energia eléctrica, o padrão de consumo de energia terá mudanças significativas, pois a procura irá diminuir.

A utilização de qualquer uma destas acções causa algum desconforto e pode ser inconveniente, sendo que estes factores devem ser incluídos na análise custo-benefício inerente às decisões da PAC. No entanto, esta análise não será discutida na presente dissertação, podendo ser considerado um tópico para trabalho futuro.

Das três acções descritas, a que melhor se adequa ao desenvolvimento da estratégia de “Gestão de Volume” é a segunda. Assim, esta estratégia consiste em determinar preços e volumes de energia para o consumidor final. Os volumes de energia serão determinados com recurso a um problema de optimização, permitindo ao consumidor final transferir quantidades de energia para os períodos em que o preço proposto pelo retalhista é menor.



O problema de otimização tem como objectivo minimizar a função Custo do agente  $Ag_c$  (consumidor final), incluindo os preços propostos pelo agente  $Ag_v$ , e os volumes de energia do agente  $Ag_c$ . A formulação matemática do problema de otimização é dada por (4.4), (4.5) e (4.6).

$$\text{Minimizar } Custo = \sum_{i=1}^6 P_i^v \times V_i^c \quad (4.4)$$

*Sujeito a :*

$$V_{i_{min}}^c \leq V_i^c \leq V_{i_{max}}^c \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^6 V_i^c = V_{tot}^c \quad (4.6)$$

O significado das variáveis das expressões (4.4), (4.5) e (4.6) é o seguinte:

$Custo$  – representa o custo do agente  $Ag_c$ ;

$P_i^v$  – representa o preço do agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ ;

$V_i^c$  – representa o volume do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$V_{i_{min}}^c$  – representa o volume mínimo do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$V_{i_{max}}^c$  – representa o volume máximo do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$V_{tot}^c$  – representa o volume total do agente  $Ag_c$ .

A restrição expressa por (4.5) garante que os volumes de energia do consumidor final estejam compreendidos entre os valores de volumes mínimos e máximos de energia do agente  $Ag_c$ . A restrição (4.6), por sua vez, garante que a quantidade de energia dada pela soma dos volumes de energia do agente  $Ag_c$  se mantenha igual, ou num intervalo próximo à soma inicial, durante a negociação. No entanto, a implementação da estratégia no SIMEPAC teve em conta uma margem mínima e máxima para a quantidade total de energia (ver a Subsubsecção 5.2.2.1).

Para além dos volumes de energia, o consumidor final negocia preços de energia. Os preços são obtidos através da seguinte fórmula:

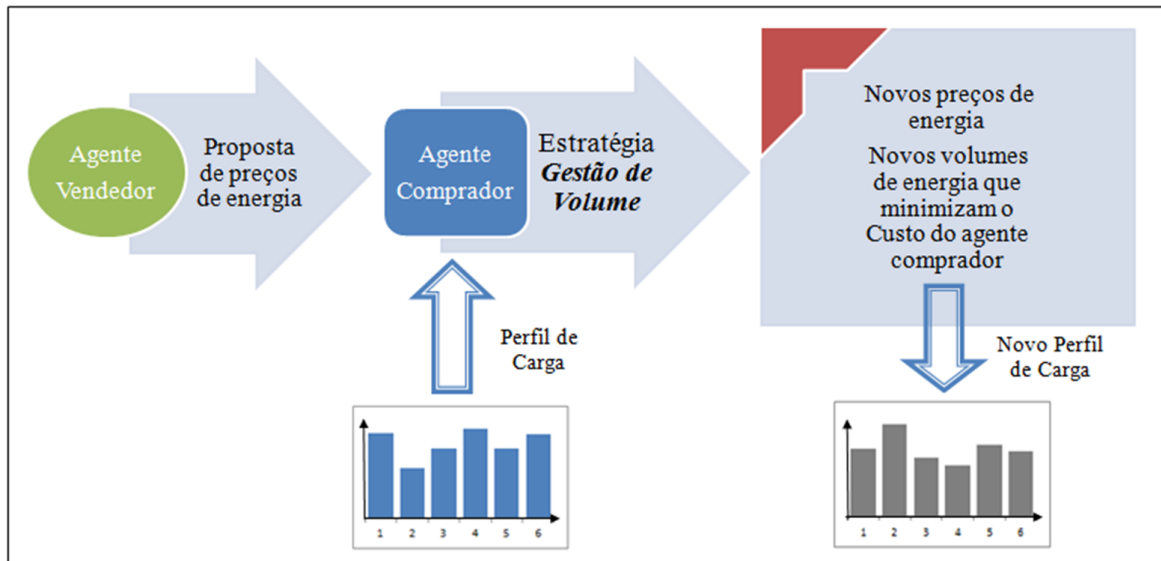
$$P_{i_{novo}}^c = P_{i_{anterior}}^c + k \times P_{i_{anterior}}^c \quad (4.7)$$

sendo:

$P_{i_{novo}}^c$  – o preço da nova proposta do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$P_{i_{anterior}}^c$  – o preço da proposta anterior do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$k$  – uma percentagem entre 0 e 100.



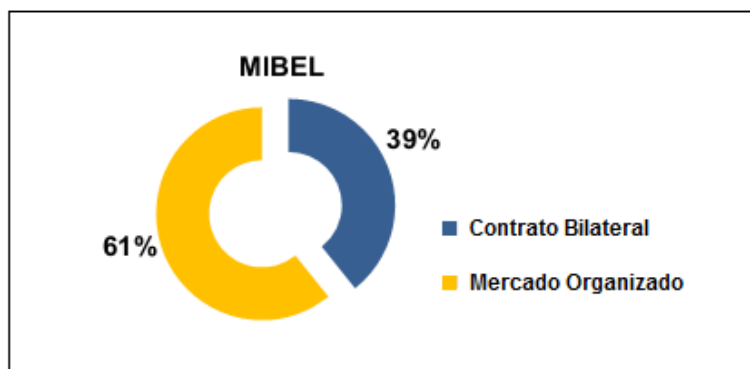
**Figura 4.4:** Esquema simplificado da aplicação da estratégia de “Gestão de Volume”.

O agente  $Ag_c$  recebe as propostas de preços de energia do agente  $Ag_v$ , tentando efectuar a gestão dos seus volumes de energia conforme a proposta de preços do opositor, bem como determinar os novos preços de energia. A Figura 4.4 apresenta um esquema simplificado da aplicação da estratégia.

## 4.4 Contratos Bilaterais em Portugal

Os contratos bilaterais são realizados directamente entre duas entidades, com preços, termos e condições negociados livremente, e especificados entre as duas partes. No âmbito do MIBEL, a contratação bilateral representou cerca de 13683 GWh, dos quais 95% dizem respeito à contratação bilateral efectuada em Espanha e apenas 5% à contratação bilateral efectuada em Portugal. Em Fevereiro de 2012, o valor total da contratação bilateral em Portugal foi de 705 GWh (15% do total de vendas de energia eléctrica), e em Espanha de 12978 GWh (43% do total de vendas de energia eléctrica) (MIBEL, 2012).

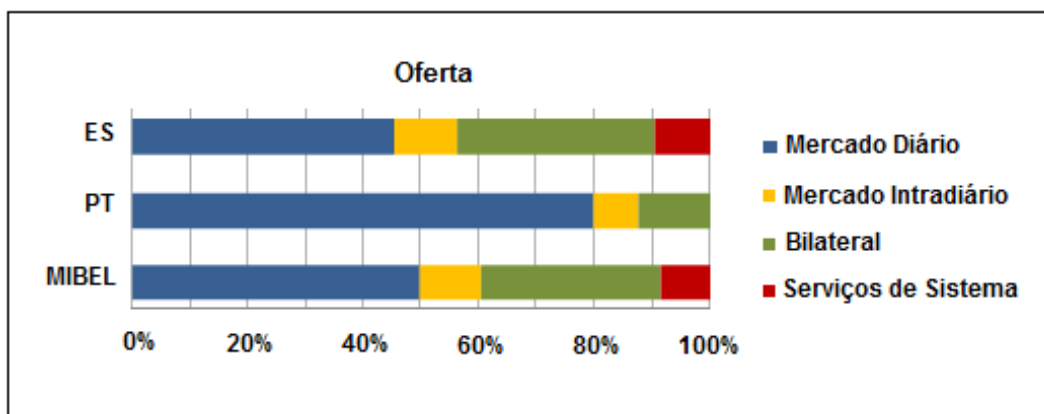
A Figura 4.5 mostra, numa perspectiva geral, que a contratação bilateral representou, em Fevereiro de 2012, no espaço do MIBEL, cerca de 39% do volume total de vendas no mercado. Observa-se também que o mercado organizado tem uma maior representação global.



**Figura 4.5:** Contratação bilateral em Portugal (MIBEL, 2012).

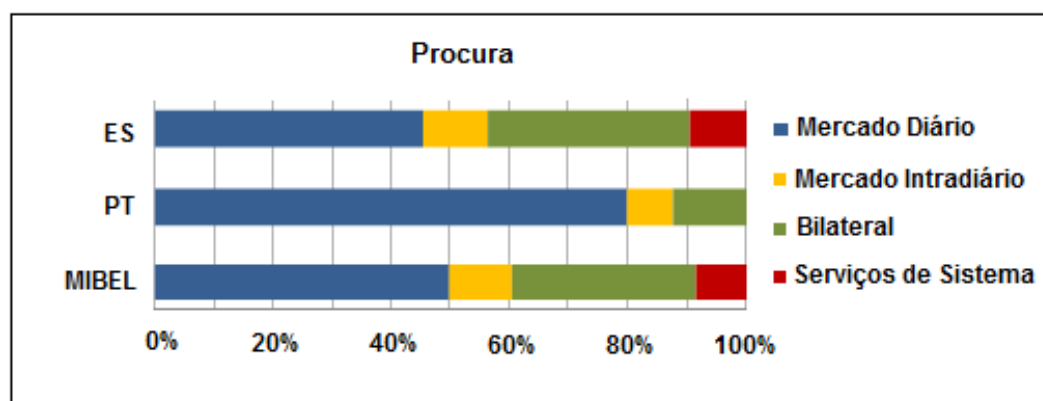
A Figura 4.6 apresenta a estrutura da oferta de energia mensal do mercado eléctrico de Portugal, Espanha e do MIBEL. Em particular, a figura é discriminada pelos seguintes segmentos de mercado: mercado diário, mercado intradiário, contratos bilaterais e mercado do serviço de sistema. No caso Português, verifica-se que a maior parte da oferta de electricidade é colocada no mercado *spot*. Os valores de negociação *spot* para Portugal incluem a liquidação dos produtos a prazo adquiridos no respectivo mercado, bem como a participação dos produtores portugueses na oferta dos leilões CESUR<sup>3</sup>.

É importante referir que, no caso Espanhol, o valor da energia vendida no mercado diário não inclui os volumes dos leilões CESUR, já que os vendedores destes programas compram neles a sua energia para a vender posteriormente através de contratos bilaterais (ERSE, 2009).



**Figura 4.6:** Estrutura de mercado – oferta (MIBEL, 2012).

<sup>3</sup>CESUR - Contratos de Energia para a Comercialização de Último Recurso. O acordo assinado em Braga em 18 de Janeiro de 2008, que revê o Acordo entre a República Portuguesa e o Reino de Espanha para a Constituição de um Mercado Ibérico de Energia Eléctrica, dispõe no número 4 do artigo 7.º, que as Partes se comprometem a instituir leilões físicos ou financeiros para aquisição de energia por parte dos fornecedores de último recurso, e a garantir um suficiente desenvolvimento dos mecanismos coordenados de aquisição de energia definidos no âmbito do MIBEL de forma a que o risco assumido pelos comercializadores de último recurso seja aceitável, em ambos os sistemas ibéricos, e que as flutuações dos preços não coloquem em perigo a sua viabilidade económico-financeira (ERSE, 2009).



**Figura 4.7:** Estrutura de mercado – procura (MIBEL, 2012).

A Figura 4.7 revela um padrão similar ao observado na Figura 4.6, mas refere-se à procura de energia eléctrica. No caso Português, é importante referir que a procura de energia eléctrica diz respeito apenas ao mercado diário e à contratação bilateral, visto que a energia adquirida a prazo é reflectida no mercado diário, ao longo do período de entrega dos respectivos contratos a prazo.

Através das Figuras 4.6 e 4.7, verifica-se que a Espanha possui uma parcela maior no mercado, que diz respeito aos contratos bilaterais, sendo o uso deste tipo de mercado superior ao realizado em Portugal. O mercado diário destaca-se por ter a maior parcela no mercado global, enquanto que o mercado intradiário ou de ajustes tem uma participação significativamente pequena. De notar, que o mercado de serviços de sistemas refere-se apenas à Espanha. Este mercado efectua o ajustamento do equilíbrio da produção e do consumo de energia eléctrica, e funciona em tempo real. Desta forma, este mercado garante o cumprimento das condições de qualidade e segurança necessárias ao fornecimento de energia eléctrica (ERSE, 2009).

## 4.5 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a descrição do processo típico de negociação bilateral, indicando-se alguns modelos de negociação, e descrevendo-se alguns aspectos inerentes à negociação, tais como os termos a serem negociados e o prazo do contrato.

Na primeira parte do capítulo foram apresentadas as principais tarefas a ter em conta no planeamento e preparação da negociação, tais como: identificar os itens da negociação e atribuir-lhes prioridades, determinar os limites, definir o protocolo e identificar as estratégias de negociação.

Descreveu-se o protocolo de ofertas alternadas adoptado no presente trabalho, utilizando duas representações diferentes, nomeadamente através de um diagrama de estados e utilizando nomenclatura da FIPA.

Na segunda parte foram descritas algumas estratégias de negociação existentes e apresentaram-se os principais aspectos das estratégias desenvolvidas no âmbito da presente dissertação: a estratégia “Gestão de Preço” para o agente retalhista e a estratégia “Gestão de Volume” para o consumidor final. Para cada agente especificaram-se os respectivos problemas de optimização.

Por fim, abordou-se o tema dos contratos bilaterais em Portugal, realizando-se uma breve análise do boletim mensal fornecido pelo MIBEL.



---

## Capítulo 5

# O Simulador SIMEPAC e Estudo de Casos Práticos

---

Este capítulo começa por descrever o simulador multi-agente SIMEPAC, desenvolvido no âmbito da presente dissertação, apresentando-se a sua *interface* gráfica e as partes fundamentais do algoritmo implementado. Posteriormente, são descritos dois casos práticos referentes à contratação bilateral de energia. Os casos práticos ilustram o funcionamento do simulador e validam a sua utilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão dos agentes intervenientes no Mercado de Energia Eléctrica.

## 5.1 Introdução

O simulador SIMEPAC: Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores, pode ser utilizado como ferramenta de treino, permitindo às entidades do mercado verificar, através de simulação, qual a melhor decisão a tomar numa negociação de contratos bilaterais. As entidades consumidoras podem adquirir conhecimento acerca das acções de Participação Activa dos Consumidores (PAC), através da estratégia desenvolvida, e desta forma conseguirem realizar uma melhor gestão do seu consumo, em resposta às ofertas de preços recebidas por parte das entidades comercializadoras de energia eléctrica.

Os dois casos práticos analisados, referentes à contratação bilateral no mercado retalhista, entre um agente de retalho e um consumidor final de energia eléctrica, permitem tirar conclusões sobre o desempenho do SIMEPAC. Ambos os casos de estudo têm como base dados de preços de energia presentes no MIBEL e perfis de carga referentes ao sector comercial e industrial. O contrato realizado entre o agente do retalho e o consumidor final de energia eléctrica envolve seis preços e seis volumes de energia, e uma duração de seis meses. Em termos práticos, o agente retalhista compra a electricidade a produtores e vende a consumidores finais.

Este capítulo é dividido em três secções. A primeira (Secção 5.2) descreve a implementação do simulador, com particular ênfase para a sua *interface* gráfica. Esta secção também descreve as etapas fundamentais do desenvolvimento do algoritmo implementado, tais como, a formulação das propostas e a definição das preferências dos agentes. A Secção 5.3 apresenta a actual situação das tarifas de energia para os consumidores em Baixa Tensão Nominal (BTN), com a passagem para o MEE liberalizado. Por fim, a Secção 5.4 descreve os dois casos práticos e apresenta a análise dos resultados obtidos.

## 5.2 SIMEPAC: Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores

O simulador SIMEPAC foi desenvolvido como ferramenta de suporte à decisão, que retrata situações reais de negociação entre um comprador e um vendedor de electricidade. Os agentes intervenientes no mercado possuem conhecimento acerca das suas propostas iniciais e negociam os preços e volumes de energia no mercado retalhista, para uma data pré-estabelecida.



O SIMEPAC foi desenvolvido através da linguagem de programação JAVA, utilizando a plataforma JADE, descrito na Subsecção 3.2.3, e consiste num simulador baseado na tecnologia multi-agente, aplicado aos contratos bilaterais em MEE. Foi utilizada a plataforma JADE devido a ser uma plataforma de livre acesso e possuir facilidades de comunicação entre os agentes.

Através da utilização do simulador, os agentes comprador e vendedor podem estudar e analisar o desempenho de diferentes técnicas e estratégias de negociação, por forma a verificarem as que se adequam melhor aos objectivos que pretendem alcançar.

O SIMEPAC possibilita simular o comportamento estratégico dos participantes, onde cada agente “adapta” a sua estratégia à medida que a simulação evolui, tendo em conta os resultados das propostas recebidas.

O simulador é flexível e possui uma *interface* simples, onde o utilizador define os dados, as preferências, inicia a negociação, e observa os resultados obtidos através da simulação.

### 5.2.1 *Interface* Gráfica

A *interface* gráfica foi desenvolvida recorrendo à linguagem de programação JAVA e contém os campos essenciais para realização de simulações, sobre a contratação bilateral de energia. Para simplificar, utilizaram-se dados relativos a um dos casos de estudo. Convém referir que a interface do SIMEPAC está em Inglês, para facilitar a divulgação internacional do trabalho desenvolvido.

Para utilizar o simulador e iniciar a negociação é necessário efectuar algumas tarefas iniciais, nomeadamente:

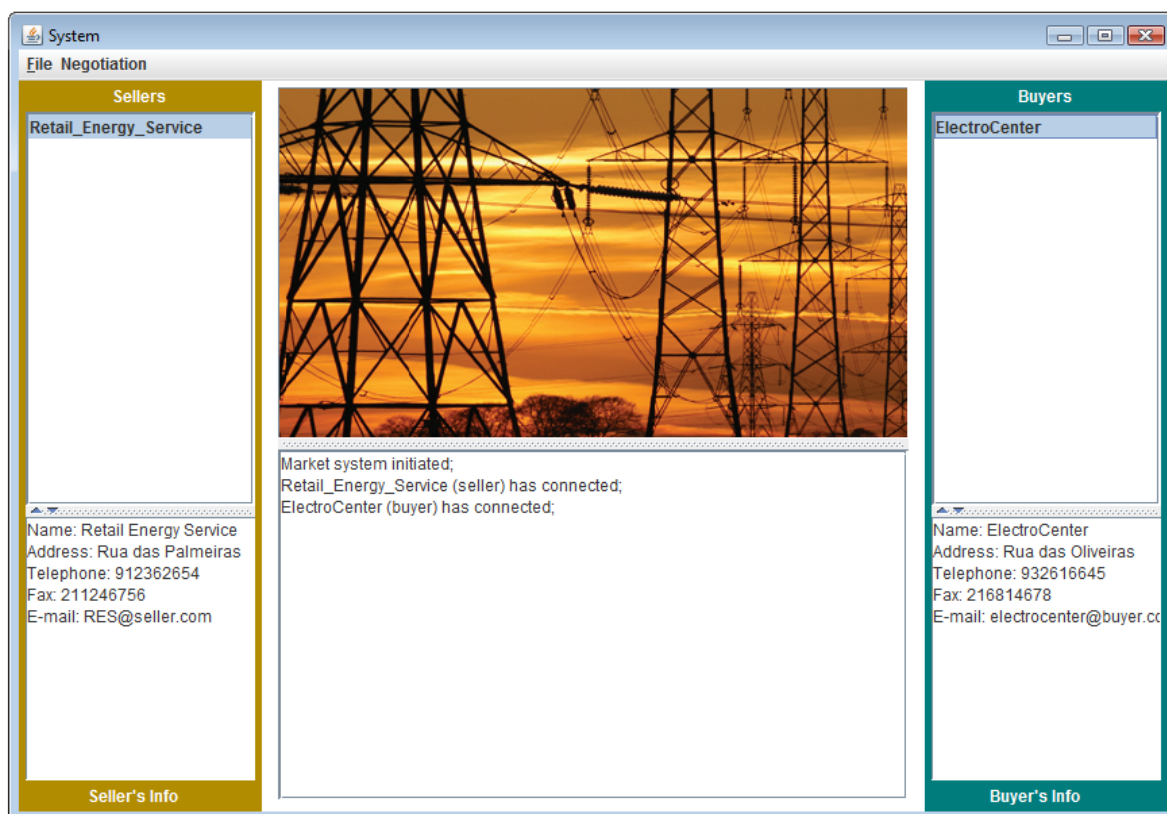
- indicar a informação pessoal de cada agente;
- seleccionar os agentes através da janela principal;
- realizar a apresentação dos agentes, ou seja, divulgar os preços de energia do agente vendedor e o perfil de carga do agente comprador;
- definir os dados iniciais de cada agente;
- definir os limites de cada agente;
- definir o protocolo, as preferências e seleccionar a estratégia a utilizar na negociação;
- definir o prazo da negociação.

The image shows two overlapping windows titled "Personal Info". The background window is for the buyer, titled "Please enter the buyer's information", and contains the following fields: Name (ElectroCenter), Address (Rua das Oliveiras), Telephone (932616645), Fax (216814678), and E-mail (electrocenter@b...). The foreground window is for the seller, titled "Please enter the seller's information", and contains the following fields: Name (Retail Energy Service), Address (Rua das Palmeiras), Telephone (912362654), Fax (211246756), and E-mail (RES@seller.com). Both windows have an "OK" button at the bottom right.

**Figura 5.1:** Janela de informação de cada agente.

As duas janelas iniciais, denominadas por *Personal Info* e apresentadas na Figura 5.1, são referentes à informação pessoal de cada agente. Uma das janelas é referente ao agente comprador e a outra ao agente vendedor. Após a inserção da informação pessoal de cada agente, clica-se no botão *OK*, obrigando o aparecimento automático dos dados na janela principal do programa.

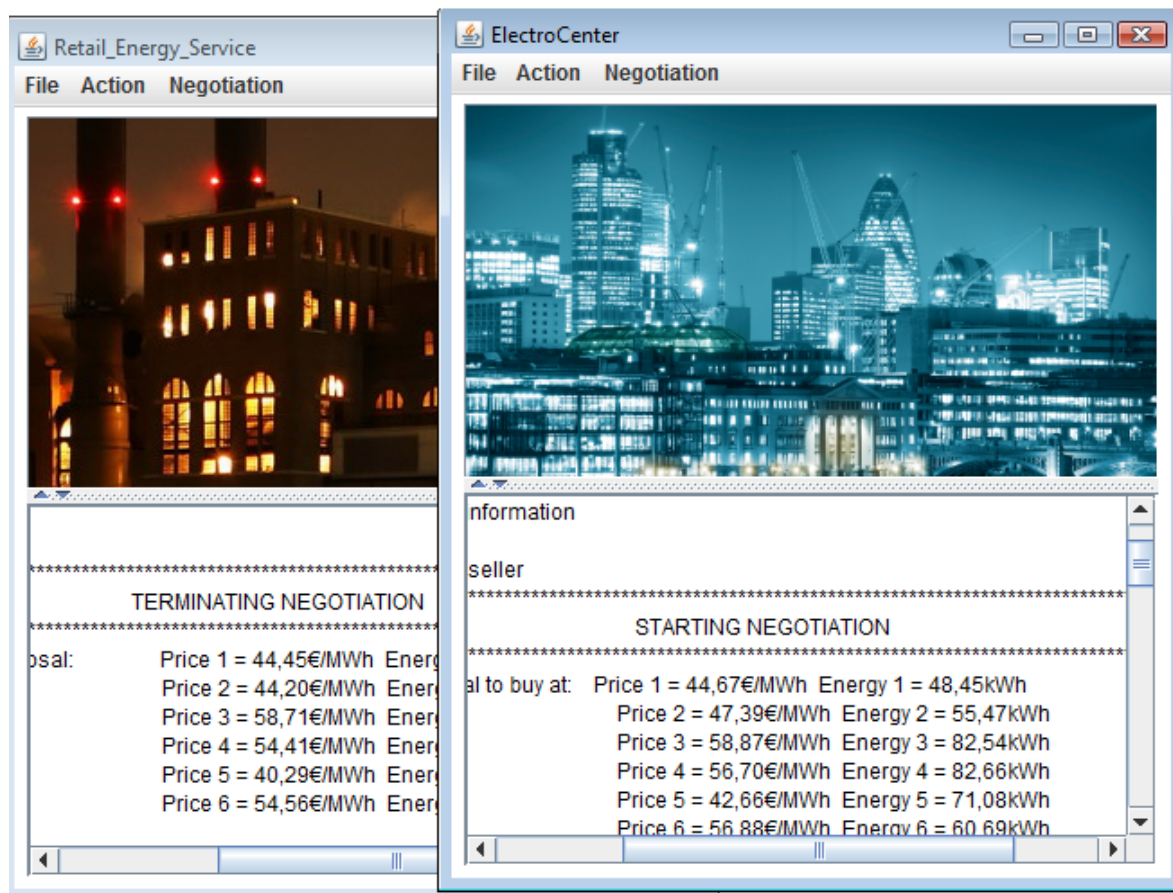
A janela principal, denominada por *System*, é apresentada na Figura 5.2 e inclui a informação de cada agente, permitindo seleccionar os agentes intervenientes, nomeadamente o vendedor (*seller*) e o comprador (*buyer*). As partes da janela denominadas de *Sellers* e *Buyers* apresentam a informação dos respectivos agentes. A barra de menu anexada ao topo da respectiva janela possui duas opções: *File* e *Negotiation*. A primeira opção permite finalizar o programa (*File* —> *Exit*). A segunda possibilita seleccionar os agentes (*Negotiation* —> *Select Parties*), surgindo assim as janelas de cada agente.



**Figura 5.2:** Janela principal do simulador.

A Figura 5.3 ilustra as janelas do agente vendedor e do agente comprador. As janelas destes agentes são semelhantes, possuindo as mesmas opções de escolha. Nesta figura, a parte inferior de cada janela é utilizada para visualizar os resultados obtidos através da negociação. A barra de menu inclui três opções de escolha:

- *File* – > *Exit*: permite fechar a janela do agente;
- *Action*:
  - > *Publicise* (para o caso do agente vendedor): permite abrir uma janela com os campos referentes aos preços de energia a serem enviados ao agente comprador;
  - > *Send Profile* (para o caso do agente comprador): permite inserir os volumes de energia e enviar o perfil de carga ao agente vendedor, bem como escolher o tipo de consumidor de energia;



**Figura 5.3:** Janelas referentes ao agente vendedor e comprador.

A Figura 5.4 apresenta as janelas de “apresentação” dos agentes, referente aos preços de energia divulgados pelo agente vendedor e ao perfil de carga do agente comprador.

- *Negotiation:*

- > *Pre-negotiation:* permite iniciar a inserção de dados sobre os parâmetros que correspondem a pré-negociação (Secções 3.2.2 e 4.2.1), sendo estes:
  - \* – > *Define Targets:* permite abrir uma janela para inserção dos preços e volumes de energia iniciais. Os preços são os que melhor satisfazem as aspirações de cada agente. É de salientar que o agente vendedor apenas define valores iniciais para os preços, ou seja, não define valores para os volumes;
  - \* – > *Define Limits:* permite abrir uma janela para inserção dos limites referentes aos preços e volumes de energia. É de salientar que o agente vendedor apenas possui limites para os preços de energia;

**Profile**

Please enter the profile values you wish to see

Comercial

Period load	Energy (kWh)
Period 1:	48.45
Period 2:	55.47
Period 3:	82.54
Period 4:	82.66
Period 5:	71.08
Period 6:	60.69

OK

**Publicity**

Please enter the values you wish to publicise:

Period load	Price (€/MWh)
Period 1:	44.67
Period 2:	47.39
Period 3:	58.87
Period 4:	56.70
Period 5:	42.66
Period 6:	56.88

OK

**Figura 5.4:** Janelas referentes ao perfil de carga do agente comprador e aos preços iniciais do agente vendedor.

- \* – > *Define Preferences and Strategies*: permite abrir uma janela que possibilita escolher o protocolo, as preferências, e a estratégia a adoptar. O campo *Preferences* é referente às preferências do utilizador. Actualmente, este campo tem apenas uma opção disponível: *Additive Function*, que diz respeito a preferências modeladas através do modelo aditivo. É de salientar que o agente vendedor possui um campo adicional referente à escolha do critério da procura do benefício para a estratégia desenvolvida (ver a Subsubsecção 5.2.2.1);
- \* – > *Define Deadline*: permite abrir uma janela que possibilita ao utilizador definir um tempo limite máximo, durante o qual estará disposto a manter a negociação. É de referir que o prazo da negociação não é um factor limitativo, pelo que por simplicidade não foi programado nenhum processo que relacione o tempo real de negociação com as decisões tomadas ao longo desta;
- > *Negotiation*: após a definição dos dados de cada agente, esta opção permite iniciar a negociação. Convém referir que qualquer dos agentes pode iniciar a negociação. O processo de negociação é ilustrado na parte inferior da janela de cada agente (ver Figura 5.3), onde fica registado o histórico das propostas enviadas e recebidas, e o resultado final.

The figure shows three overlapping windows from the SIMEPAC simulator, used for pre-negotiation by the buyer agent.

- Targets Window:** Contains a table for 'Initial Values (Targets)' with columns 'Period load' and 'Price (€/MWh)'. It lists values for Periods 1 through 6.
- Limits Window:** Contains a table for 'Limits: Fall Back Position' with columns 'Period load', 'Price (€/MWh)', and 'Energy'. It lists values for Periods 1 through 6.
- Protocol, Preference and Strategy Window:** Contains dropdown menus for 'Protocol' (set to 'Alternating Offers'), 'Preference' (set to 'Additive Function'), and 'Strategies' (set to 'Demand Management'). It also has an 'OK' button.

**Figura 5.5:** Janelas referentes a pré-negociação do agente comprador.

The figure shows three overlapping windows from the SIMEPAC simulator, used for pre-negotiation by the buyer agent, specifically related to deadline setting.

- Deadline Window (Top):** Contains the text 'Enter initial deadline proposal' and a 'Propose' button.
- Deadline Window (Middle):** Displays 'Opponent deadline proposal: Thu Sep 06 22:23:08 BST 2012' and has 'Accept' and 'Propose' buttons.
- Edit time Window (Bottom):** Contains a 'Time' section with input fields for Year (2012), Month (8), Day (6), Hour (22), Min (23), and Sec (8). It also has 'Set', 'Reset', and 'Cancel' buttons.

**Figura 5.6:** Janelas referentes a pré-negociação do agente comprador, definição do prazo da negociação.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam várias janelas de pré-negociação para agente comprador, sendo essas semelhantes para o agente vendedor.

Para além disso, é importante referir que todos os campos devem estar preenchidos, por forma a que a negociação seja possível. Caso contrario, é apresentada uma mensagem de erro, com a seguinte informação: *“Some inputs are missing”*. Nas janelas *Profile*, *Publicity* e de pré-negociação, os campos devem ser preenchidos com números positivos e reais.

## 5.2.2 Descrição do Algoritmo

Esta secção apresenta as etapas fundamentais do desenvolvimento do algoritmo implementado, descrevendo-se como são preparadas as propostas e contrapropostas dos agentes, e a modalidade de avaliação destas.

### 5.2.2.1 Formulação das Propostas dos Agentes

No presente trabalho, as propostas são constituídas por seis parâmetros, que dizem respeito aos preços e volumes de energia. Cada proposta formulada pelo agente vendedor ( $Ag_v$ ) possui seis preços, correspondentes a seis períodos horários, e cada proposta enviada pelo agente comprador ( $Ag_c$ ), para além dos preços, é também composta por seis volumes. Como o algoritmo possibilita a qualquer dos agentes iniciar a negociação, as propostas são definidas no início da negociação ou em resposta a uma proposta recebida.

No algoritmo, considerou-se que independentemente de qual o agente a iniciar a negociação, o agente  $Ag_v$  opta sempre por enviar a sua proposta inicial. Para o caso de ser o agente  $Ag_c$  a iniciar a negociação, a sua proposta é reformulada, em resposta aos preços divulgados pelo agente  $Ag_v$ .

Sejam  $P_{i_{t_n}}^v$  o preço do período  $i$  ( $i \in [1, 6]$ ) de uma proposta  $prop_{t_n}$  enviada pelo agente  $Ag_v$  no instante  $t_n$ , e  $P_{i_{t_{n+1}}}^v$  o preço desse período  $i$  da proposta  $prop_{t_{n+2}}$  enviada no instante  $t_{n+2}$ . De igual modo, sejam  $V_{i_{t_n}}^c$  o volume e  $P_{i_{t_n}}^c$  o preço do período  $i$  de uma proposta enviada pelo agente  $Ag_c$  no instante  $t_n$ , e  $V_{i_{t_{n+1}}}^c$  o volume e  $P_{i_{t_{n+1}}}^c$  o preço desse período  $i$  da proposta  $prop_{t_{n+2}}$  enviada no instante  $t_{n+2}$ . Os agentes trocam propostas alternadamente, com um agente a submeter preços nos períodos ímpares e o outro nos períodos pares. As estratégias escolhidas por cada agente permitem determinar os preços ( $P_{i_{t_{n+1}}}^v$  e  $P_{i_{t_{n+1}}}^c$ ) e o volume ( $V_{i_{t_{n+1}}}^c$ ) das propostas a enviar. Estas estratégias são distintas para cada agente, possuindo particularidades específicas, sendo apresentadas de seguida.

#### Agente vendedor

A formulação das propostas do agente  $Ag_v$  é realizada recorrendo-se à estratégia de “Gestão de Preço” (ver a Subsecção 4.3.1). Esta estratégia é implementada com base num algoritmo que procura encontrar os conjuntos de seis preços que maximizam o benefício de  $Ag_v$ . Convém relembrar que o agente  $Ag_v$  aceita os volumes de energia propostos por  $Ag_c$  e ajusta os seus preços de acordo com esses volumes.

O algoritmo envolve uma lista que engloba todas as combinações possíveis de preços compreendidas num intervalo de procura de benefícios e num intervalo de procura de preços.

O intervalo de procura de benefícios inclui todos os valores do benefício contidos no seguinte conjunto:

$$\{B_{actual}^v - \delta_{inicial}, \dots, (B_{actual}^v - \delta_{inicial}) - \delta_{final}\}$$

onde:

$$B_{actual}^v = \sum_{i=1}^6 (P_{it_n}^v - P_{imin}^v) \times V_{it_n}^c \quad (5.1)$$

sendo:

$B_{actual}^v$  – o benefício actual do agente  $Ag_v$ ;

$\delta_{inicial}$  – o parâmetro inicial de procura do benefício;

$\delta_{final}$  – o parâmetro final de procura do benefício.

Caso não seja encontrada nenhuma combinação de preços para os quais o valor do benefício esteja compreendido no intervalo referido, a procura é aumentada de  $2\delta_{final}$ , e assim sucessivamente. A escolha dos valores para os parâmetros  $\delta_{inicial}$  e  $\delta_{final}$  foi realizada tendo em conta o tempo de execução, sendo os seus valores apresentados na Subsecção 5.4.4 (para os casos de estudo analisados).

O intervalo de procura de preços inclui todas as combinações de preços compreendidas entre o preço mínimo ( $P_{imin}^v$ ) e máximo ( $P_{imax}^v$ ) do agente  $Ag_v$ , sendo o preço incrementado por um parâmetro  $\Delta_p$ , do seguinte modo:

$$\{P_{imin}^v, P_{imin}^v + \Delta_p, P_{imin}^v + 2\Delta_p, P_{imin}^v + 3\Delta_p, \dots, P_{imax}^v\}$$

sendo:

$\Delta_p$  – o parâmetro de procura do preço.

Neste caso, quanto menor for o parâmetro  $\Delta_p$ , mais combinações de preços podem ser encontradas. No entanto, a procura torna-se mais exaustiva, aumentando o tempo de execução. Assim, o valor atribuído a  $\Delta_p$  foi determinado tendo em conta o rácio entre o tempo de execução e a qualidade dos resultados obtidos, sendo apresentado na Subsecção 5.4.4.

Por forma a encontrar a proposta com o conjunto de preços que maximiza o benefício de  $Ag_v$ , são definidos dois critérios de escolha da solução óptima, nomeadamente:

1. Critério do máximo benefício
2. Critério da distância vectorial



O critério do máximo benefício verifica e calcula o benefício de todas as combinações de preços, incluídas nos intervalos referidos acima, através da seguinte expressão:

$$B_{possível}^v = \sum_{i=1}^6 \left( (P_{i_{t_{n+1}}}^v)_{possível} - P_{i_{min}}^v \right) \times V_{i_{t_{n+1}}}^c \quad (5.2)$$

sendo:

$B_{possível}^v$  – o benefício possível do agente  $Ag_v$ ;

$(P_{i_{t_{n+1}}}^v)_{possível}$  – o preço possível a enviar pelo agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ , no instante  $t_{n+1}$ ;

$V_{i_{t_{n+1}}}^c$  – o volume recebido do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ , no instante  $t_{n+1}$ .

Assim, de entre todos os valores possíveis obtidos através da expressão (5.2), é escolhido o mais elevado, sendo o respectivo conjunto de preços  $(P_{i_{t_{n+1}}}^v)$  incluído na proposta a enviar.

No algoritmo, o critério do máximo benefício foi implementado do seguinte modo:

```
for (int i = 0; i < possible_new_prices.length; i++){
    sum_benefit = sum_benefit + ((possible_new_prices[i]-
        getPricesLimitsMin()[i]) * buyer_prices_volumes_current[i + 6]);
} return sum_benefit;
```

Em relação ao critério da distância vectorial, este calcula e verifica qual a combinação de preços que está mais próxima dos preços da proposta anterior, recorrendo à formula da distância vectorial:

$$d_p = \sqrt{\left( (P_{i_{t_{n+1}}}^v)_{possível} - P_{i_{t_n}}^v \right)^2} \quad (5.3)$$

sendo:

$d_p$  – a distância entre os preços.

Desta forma, de entre todas as combinações possíveis de preços, escolhe-se o conjunto cuja distância (obtida pela expressão (5.3)) seja menor, sendo que para este conjunto o valor do benefício é máximo. O conjunto de preços encontrado  $(P_{i_{t_{n+1}}}^v)$  é incluído na proposta a enviar.

No algoritmo, o cálculo da distância vectorial foi implementado de seguinte forma:

```
for (int i = 0; i < possible_new_prices.length; i++) {
    distance = distance + Math.pow(this.seller_prices_volumes_previous[i]
        - possible_new_prices[i], 2);
} distance = Math.sqrt(distance);
return Math.abs(distance);
```

A implementação da escolha dos critérios e dos respectivos conjuntos de preços óptimos foi efectuada de seguinte forma:

```

if (vectorial_distance) {
// Vectorial distance option
    distance_aux = calculateVectorialDistance(
        getBenefitList().get(benefit_values[i]).get(j));
    if (distance_aux < nearest_vectorial_distance) {
        nearest_vectorial_distance = distance_aux;
        new_prices = benefit_list.get(benefit_values[i]).get(j);
    } else {
// Maximum benefit option
        sum_benefit_aux =
        calculateSumBenefit(getBenefitList().get(benefit_values[i]).get(j));
        if (sum_benefit_aux > sum_maximum_benefit) {
            sum_maximum_benefit = sum_benefit_aux;
            new_prices = benefit_list.get(benefit_values[i]).get(j);}}

```

### Agente comprador

O algoritmo desenvolvido para a estratégia “Gestão de Volume” (ver Subsecção 4.3.2) do agente  $Ag_c$  procura encontrar todos os conjuntos de volumes que minimizam o seu custo. É de salientar, que o agente  $Ag_c$  ajusta os volumes da proposta a enviar conforme a oferta de preços recebida de  $Ag_v$ .

O algoritmo envolve uma lista que engloba todas as combinações possíveis de volumes, cuja quantidade total de energia (dada pela soma dos volumes) se mantém igual ou num intervalo próximo à quantidade de energia inicial, satisfazendo a restrição dada pela expressão (4.6), do problema de optimização descrito na Subsecção 4.3.2. Neste trabalho, foram consideradas margens mínima e máxima para a quantidade total de energia, sendo estas margens definidas na Subsecção 5.4.4. Desta forma, a soma total dos volumes está compreendida no seguinte intervalo:

$$\sum_{i=1}^6 V_i^c - \delta_m \leq \sum_{i=1}^6 V_i^c \leq \sum_{i=1}^6 V_i^c + \delta_m$$

sendo:

$V_i^c$  – o volume do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ ;

$\delta_m$  – o valor da margem mínima e máxima, para a quantidade total de energia.

Todas as combinações de volumes estão compreendidas entre os limites mínimo ( $V_{i_{min}}^c$ ) e máximo ( $V_{i_{max}}^c$ ) de volume do agente  $Ag_c$ , por forma a satisfazerem a restrição expressa em (4.6) (ver Subsecção 4.3.2). Os volumes são incrementados por um parâmetro  $\Delta_v$ , do seguinte modo:

$$\{V_{i_{min}}^c, V_{i_{min}}^c + \Delta_v, V_{i_{min}}^c + 2\Delta_v, V_{i_{min}}^c + 3\Delta_v, \dots, V_{i_{max}}^c\}$$

sendo:

$\Delta_v$  – o parâmetro de procura do volume.

Quanto menor for o parâmetro  $\Delta_v$ , mais combinações de volumes podem ser encontradas. No entanto, a procura torna-se mais exaustiva, e por conseguinte aumenta o tempo de execução. Desta forma, o valor atribuído a  $\Delta_v$  foi escolhido tendo em conta o rácio entre o tempo de execução e a qualidade dos resultados obtidos, sendo definido na Subsecção 5.4.4.

A solução óptima, que define o conjunto de volumes para o qual o custo é mínimo, é escolhida segundo o critério do custo mínimo. Este critério calcula e verifica, entre todas as combinações possíveis de volumes da lista de procura, qual o conjunto de volumes que minimiza o custo do agente  $Ag_c$ :

$$C_{possível}^c = \sum_{i=1}^6 \left( V_{i_{t_{n+1}}}^c \right)_{possível} \times P_{i_{t_{n+1}}}^v \quad (5.4)$$

sendo:

$C_{possível}^c$  – o custo possível do agente  $Ag_c$ ;

$(V_{i_{t_{n+1}}}^c)_{possível}$  – o volume possível a enviar do agente  $Ag_c$ , para o período  $i$ , no instante  $t_{n+1}$ ;

$P_{i_{t_{n+1}}}^v$  – o preço recebido do agente  $Ag_v$ , para o período  $i$ , no instante  $t_{n+1}$ .

Assim, de entre todos os valores possíveis obtidos através da expressão (5.3), escolhe-se o valor mínimo do custo, sendo o respectivo conjunto de volumes ( $V_{i_{t_{n+1}}}^c$ ) incluído na proposta a enviar.

A determinação dos novos preços ( $P_{i_{t_{n+1}}}^c$ ) do agente  $Ag_c$  é efectuada através da expressão (4.7), apresentada na Subsecção 4.3.2, sendo o preço  $P_{i_{t_n}}^c$  incrementado de uma percentagem  $k = 7\%$ .

No algoritmo, o critério de custo mínimo e a escolha dos conjuntos de volumes para os quais o custo é mínimo foram implementados da seguinte forma:

```
//-----<<< Criterion of choice for Volumes - Minimum Cost >>>-----
for (int i = 0; i < keys_array.length; i++) {
    for (int j = 0; j < getCostList().get(keys_array[i]).size(); j++) {
        for (int z = 0; z < new_volumes.length; z++) {
            sum_cost_aux += getCostList().get(keys_array[i]).get(j)[z]
                           * opponents_prices[z]; }
        if (sum_cost_aux < sum_cost_minimum) {
            sum_cost_minimum = sum_cost_aux;
            new_volumes = getCostList().get(keys_array[i]).get(j);}
    }}
}}
```

### 5.2.2.2 Preferências dos agentes

A avaliação das propostas é realizada com base nas preferências dos agentes, sendo aplicado o modelo aditivo. Este modelo é adequado quando se pretende avaliar situações em que é necessário decidir entre os vários itens. No entanto, o modelo não é apropriado quando existe uma interacção entre os itens. Deste modo, a fim de aplicar o modelo, é necessário assumir que existe independência entre os itens. Para o caso de existir interdependência entre os itens, um modelo adequado consiste, por exemplo, no modelo multiplicativo (Goodwin e Wright (2004)). Convém referir, que neste trabalho os itens não são independentes. No entanto, manteve-se o modelo aditivo para análise das propostas dos agentes, por uma questão de simplicidade.

A avaliação das propostas é realizada através das expressões (4.1) e (4.3), para o agente  $Ag_v$ , e (4.4) para o agente  $Ag_c$ . Um agente recorre a estas expressões quando recebe uma proposta e precisa de decidir se a aceita ou se envia uma contraproposta. Todas as propostas são analisadas, sendo calculados os valores do benefício e custo.

Para o caso do agente  $Ag_c$ , o programa verifica se a avaliação do custo da proposta recebida ( $C_{rcv}$ ) é maior que a avaliação do custo da proposta que poderá enviar ( $C_{cmp}$ ), ou seja,  $C_{rcv} > C_{cmp}$ . Se a condição se verificar,  $Ag_c$  envia uma contraproposta usando a estratégia referente ao agente consumidor. No caso da condição não se verificar,  $Ag_c$  aceita a proposta recebida. Para o caso do agente  $Ag_v$ , a forma de avaliação é semelhante, verificando-se se o benefício da proposta recebida ( $B_{rcv}$ ) é menor que o benefício da proposta a enviar ( $B_{cmp}$ ), ou seja,  $B_{rcv} < B_{cmp}$ . Se esta condição se verificar,  $Ag_v$  envia a contraproposta usando a estratégia referente ao agente retalhista. No caso da não se verificar,  $Ag_v$  aceita a proposta recebida.

Convém referir que para além da avaliação das propostas recebidas e das propostas a enviar, o programa também realiza uma avaliação das propostas limites de cada agente,

por forma a decidir se este continua ou abandona a negociação. Assim, para  $Ag_c$ , se o custo da proposta recebida ( $C_{rcv}$ ) for superior ao seu custo máximo ( $C_{max}$ ), ou seja,  $C_{rcv} > C_{max}$ , a negociação continua. Caso contrário, a negociação termina. Para o caso de  $Ag_v$ , este compara o benefício mínimo ( $B_{min}$ ) com a função da proposta recebida ( $B_{rcv}$ ). Se  $B_{rcv} > B_{min}$ , a negociação continua.

No algoritmo, o cálculo das funções de avaliação e a tomada de decisão referente ao envio da contraproposta ou aceitação da proposta foi implementado da seguinte forma:

#### **Agente comprador :**

```
//Computing Costs of received and new - Ready to send - Proposals
for (int i = 0; i < 6; ++i){
    Crcv = Crcv + tariff_rcv[i + 6] * tariff_rcv[i];
    Ccmp = Ccmp + tariff_cmp[i + 6] * tariff_cmp[i];
//Teste whether to accept or reject the received proposal
    if (Crcv > Ccmp || manager.n_proposals_received <=1)
    {
        reply.setPerformative(ACLMessage.PROPOSE);
    }
    else {
        reply.setPerformative(ACLMessage.ACCEPT_PROPOSAL);
    }
}
```

#### **Agente vendedor :**

```
//Computing Benefits of received and new - Ready to send - Proposals
for (int i = 0; i < 6; ++i){
    Brcv = Brcv + tariff_rcv[i + 6] * tariff_rcv[i]
           - tariff_rcv[i + 6] * min_p[i];
    Bcmp = Bcmp * tariff_cmp[i + 6] * tariff_cmp[i]
           - tariff_cmp[i + 6] * min_p[i];}
//Teste whether to accept or reject the received proposal
    if (Brcv < Bcmp || manager.n_proposals_received <=1){
        reply.setPerformative(ACLMessage.PROPOSE);
    }
    else {
        reply.setPerformative(ACLMessage.ACCEPT_PROPOSAL);
    }
}
```

## 5.3 Tarifas de Energia

O principal objectivo de um tarifário de energia eléctrica consiste na minimização da distorção face à formação dos preços que vigorariam num mercado de concorrência. As tarifas devem reflectir os custos marginais. Havendo economias de escala, como no caso do transporte e da distribuição, o custo médio reduz-se quando é aumentado o volume de energia fornecida. A fixação de preços baseada em custos marginais não permite recuperar todos os custos, sendo necessário que as tarifas sejam fixadas num nível superior (Paiva, 2007).

As tarifas de acesso às redes são pagas por todos os consumidores de energia eléctrica e incluem as tarifas de Energia, Uso Global do Sistema, Uso da Rede de Transporte, Uso da Rede de Distribuição, de Comercialização e de Venda a Clientes Finais. Os clientes que escolherem o seu comercializador pagam as tarifas de acesso às redes e negociam livremente (com o comercializador) os preços de energia eléctrica e de comercialização.

As tarifas de venda a clientes finais são diferenciadas pelos níveis de tensão e do tipo de fornecimento, sendo constituídas por várias opções. No entanto, as medidas recentes aprovadas pelo governo (Decreto-Lei n.º 75/2012<sup>1</sup>) estabelecem o regime de extinção das tarifas reguladas de venda de energia eléctrica a clientes finais em BTN (potência contratada inferior ou igual a 41,4 kVA), no território continental, aproximando assim os consumidores do mercado liberalizado (ERSE, 2012a).

A liberalização do mercado de electricidade em Portugal irá entrar na sua fase plena com a extinção gradual das tarifas reguladas para todos os consumidores. A 1.ª fase de extinção das tarifas reguladas de venda de electricidade aos clientes em BTN, iniciou-se em 1 de Julho de 2012, para os clientes de electricidade com potência contratada igual ou superior a 10,35 kVA. Este segmento de clientes só pode contratar o seu fornecimento de electricidade com um comercializador em regime de mercado. Os consumidores que ainda se encontrem a ser abastecidos por um comercializador de último recurso devem proceder à mudança para um comercializador em regime de mercado até 31 de Dezembro de 2014, e os que sejam fornecidos por um comercializador em regime de mercado não podem voltar a celebrar contrato com um comercializador de último recurso. A partir do dia 1 de Julho de 2012, aos clientes que mantenham os seus contratos de fornecimento de electricidade com um comercializador de último recurso, será aplicada uma tarifa de venda transitória, fixada pela ERSE.

A 2.ª fase de extinção das tarifas reguladas de venda de electricidade a clientes em BTN com uma potência contratada inferior a 10,35 kVA terá início a partir de 1 de Janeiro de 2013 para os clientes de electricidade com potência contratada inferior a 10,35 kVA. A aplicação de tarifas de venda transitórias (fixadas pela ERSE), aos clientes

---

<sup>1</sup>O Decreto-Lei n.º 75/2012 conclui o processo iniciado pelo Decreto-Lei n.º 104/2010, que determinou a extinção das tarifas reguladas para os clientes com consumos em MTA, AT, MT e BTE.

que mantenham o seu fornecimento de electricidade através de um comercializador de último recurso, devem terminar em 31 de Dezembro de 2015.

Após o fim das tarifas, os consumidores que não optarem por realizar um novo contrato com um comercializador em mercado liberalizado, continuarão a ser fornecidos pela EDP Serviço Universal durante um período transitório máximo de 3 anos. Durante este período, serão aplicadas tarifas transitórias com agravamento de preços, definidas pela ERSE, que serão superiores ao preço de mercado, de forma a induzir a transição gradual dos consumidores para os comercializadores livres (EDP, 2012).

A lista integral dos comercializadores de electricidade em regime de mercado, licenciados ou registados, pode ser encontrada no portal da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG)<sup>2</sup>, entre os quais fazem parte a EDP Comercial, Endesa, Iberdrola, Galp Energia, etc.

## 5.4 Estudo de Casos Práticos

Nesta secção são apresentados dois casos de estudo usados para analisar o simulador desenvolvido. Ambos os casos envolvem a negociação de contratos bilaterais entre um agente retalhista e um agente consumidor final de energia.

O primeiro caso de estudo é referente à negociação entre um agente retalhista e um consumidor final do tipo comercial, enquanto que o segundo diz respeito a um consumidor final do tipo industrial. De modo a verificar a variação das cargas de energia dos consumidores, para os seis períodos horários, considerou-se que o mesmo agente retalhista efectua propostas de preços de energia eléctrica distintas para cada consumidor final.

Esta secção descreve também o processo de obtenção dos preços e volumes de referência de energia, bem como das propostas iniciais dos agentes. Por fim, apresentam-se e analisam-se os resultados das simulações.

### 5.4.1 Preços e Volumes de Referência

#### 5.4.1.1 Preços de Referência

Com a extinção das tarifas reguladas de venda de energia eléctrica aos consumidores finais com consumos em BTN, a respectiva venda fica submetida ao regime de preços livres, deixando de serem fixados anualmente pela ERSE. Os preços praticados pelos comercializadores aos seus clientes são livres, sendo negociados entre as partes (EDP, 2012). Neste trabalho, foram considerados dois conjuntos de preços de referência, para os casos práticos. A metodologia utilizada para o cálculo dos preços de referência da

---

<sup>2</sup>[www.dgeg.pt](http://www.dgeg.pt)

**Tabela 5.1:** Preços de referência da energia.

Período Horário [h]	Preços de Referência (Caso 1) [€/MWh]	Preços de Referência (Caso 2) [€/MWh]
1 (24:00 - 4:00)	40,61	46,57
2 (4:00 - 8:00)	43,08	47,14
3 (8:00 - 12:00)	53,52	65,52
4 (12:00 - 16:00)	51,55	61,12
5 (16:00 - 20:00)	38,79	55,19
6 (20:00 - 24:00)	51,71	52,94

energia teve como base os preços horários do mercado diário <sup>3</sup> fornecidos no portal da OMIE<sup>4</sup> (ver Anexo A).

A Tabela 5.1 apresenta os preços de referência. Foram considerados seis períodos horários para o consumo de energia eléctrica. Os preços referentes a cada período foram obtidos através da média aritmética dos quatro preços envolvidos em cada período.

#### 5.4.1.2 Volumes de Referência

Os volumes de energia dizem apenas respeito ao consumidor final. A entidade de retalho tem em conta o pressuposto de que o agente retalhista garante o fornecimento de energia eléctrica ao consumidor final, para qualquer período do dia.

A metodologia utilizada para o cálculo dos volumes de referência teve como base os perfis de carga dos consumidores fornecidos no portal da NYSEG<sup>5</sup> (ver Anexo B). Os volumes de energia dos perfis de carga dos consumidores são apresentados para as vinte quatro horas diárias de cada mês do ano, envolvendo o consumo durante a semana e ao fim de semana. A Tabela 5.2 apresenta os volumes de referência para cada tipo de consumidor, sendo descritos no Anexo B os passos efectuados para obtenção destes volumes.

<sup>3</sup>O mercado diário, como parte integrante do mercado de produção de energia eléctrica, tem por objectivo levar a cabo as transacções de energia eléctrica para o dia seguinte, mediante a apresentação de ofertas de venda e aquisição de energia eléctrica, por parte dos agentes do mercado.

<sup>4</sup>[www.omie.es](http://www.omie.es)

<sup>5</sup>NYSEG - New York State Electric & Gas, disponível em [www.nyseg.com](http://www.nyseg.com)



**Tabela 5.2:** Volumes de referência de energia.

Período Horário [h]	Volumes de Referência (Caso 1) [kWh]	Volumes de Referência (Caso 2) [kWh]
1 (24:00 - 4:00)	48,45	84,51
2 (4:00 - 8:00)	55,47	114,14
3 (8:00 - 12:00)	82,54	327,21
4 (12:00 - 16:00)	82,66	249,70
5 (16:00 - 20:00)	71,08	127,83
6 (20:00 - 24:00)	60,69	132,34

### 5.4.2 Agente Retalhista

Um agente de retalho é uma entidade que surgiu com a liberalização do mercado, e que tem licença legal para vender electricidade a retalho. Esta entidade compra energia eléctrica e outros serviços, que podem ser combinados em pacotes com determinadas características, e vendidos directamente aos consumidores finais. Para os casos práticos, o retalhista foi designado genericamente por *Retail Energy Service*.

#### 5.4.2.1 Preços iniciais

Neste trabalho, os preços de referência foram utilizados para obter os preços iniciais de cada agente. Em particular, o agente retalhista inicia a negociação com uma proposta superior aos preços de referência, sendo adicionado 10% a cada preço. Os limites são inferiores aos preços de referência, que sofrem uma redução de 9%. Estes intervalos foram determinados de forma intuitiva, de modo a preservar uma margem de manobra entre os preços de energia. O resumo dos dados referentes ao agente retalhista são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

### 5.4.3 Consumidor final

A energia eléctrica tem como destino final o sector residencial, industrial, comercial e rural. Com a liberalização do mercado, todos estes passaram a ser elegíveis, ou seja, passaram a poder escolher livremente o fornecedor de energia. Nos casos em estudo, foram considerados dois tipos de entidades consumidoras de energia eléctrica, nomeadamente comercial e industrial.

**Tabela 5.3:** Resumo dos valores iniciais do agente retalhista (Caso de Estudo 1).

Período Horário [h]	Preço [€/MWh]	Limite [€/MWh]
1	44,67	36,95
2	47,39	39,20
3	58,87	48,71
4	56,70	46,91
5	42,66	35,29
6	56,88	47,06

**Tabela 5.4:** Resumo dos valores iniciais do agente retalhista (Caso de Estudo 2).

Período Horário [h]	Preço [€/MWh]	Limite [€/MWh]
1	51,23	42,38
2	51,85	42,89
3	72,02	59,62
4	67,23	55,62
5	60,71	50,23
6	58,23	48,17

A entidade comercial representa uma empresa designada por *ElectroCenter*, de BTN com potência contratada de 20,7 kW. Considera-se que o horário de funcionamento da instalação começa às 8h e termina às 19h, durante os dias úteis. Por sua vez, a entidade industrial, denomina-se de *TechnoIndustry* e recebe energia em MT, sendo a sua potência instalada de 1000 kW, e o horário de funcionamento das 8h às 22h.

#### 5.4.3.1 Preços e Volumes iniciais

Os preços da proposta inicial do agente consumidor são inferiores aos estabelecidos pelo agente retalhista. Para o seu cálculo foram usados os preços de referência obtidos na Subsubsecção 5.4.1.1. Especificamente, os preços iniciais são obtidos a partir de uma redução de 10% nos preços de referência, e os limites são aumentados em 7%. Os dados iniciais, referente ao agente consumidor, são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Os volumes de referência foram considerados como sendo os volumes de energia da proposta inicial. Os limites foram calculados tendo em conta os valores de referência, sendo os volumes mínimos reduzidos de 32% e os máximos acrescentados de 34%. Estes

**Tabela 5.5:** Resumo dos valores iniciais do consumidor de energia (Caso de Estudo 1).

<b>Período Horário [h]</b>	<b>Preço [€/MWh]</b>	<b>Limite [€/MWh]</b>	<b>Volume [kWh]</b>	<b>Limite Volume mínimo [kWh]</b>	<b>Limite Volume máximo [kWh]</b>
1	36,54	43,45	48,45	32,94	64,92
2	38,77	46,10	55,47	37,72	74,33
3	48,17	57,27	82,54	56,13	110,60
4	46,39	55,16	82,66	56,21	110,77
5	34,91	41,50	71,08	48,33	95,24
6	46,54	55,33	60,69	41,27	81,33

intervalos foram definidos de forma intuitiva, de modo a preservar uma margem de manobra.

#### 5.4.4 Resultados

Antes da recolha dos resultados finais da negociação, foi necessário atribuir valores aos parâmetros do algoritmo (ver Subsubsecção 5.2.2.1). Estes parâmetros variam para os casos de estudo propostos, pois o tempo de execução da simulação difere para ambos os cenários. Isto deve-se, em grande parte, aos perfis de carga dos consumidores finais, sendo que quanto maior for a quantidade de energia eléctrica, mais exaustiva se torna a procura de propostas. A escolha dos parâmetros também teve em conta a qualidade dos resultados obtidos após várias simulações, verificando-se que, quanto menores forem os parâmetros, melhores são os resultados. Na Tabela 5.7 apresentam-se os valores dos parâmetros referentes aos casos de estudo.

**Tabela 5.6:** Resumo dos valores iniciais do consumidor de energia (Caso de Estudo 2).

<b>Período Horário [h]</b>	<b>Preço [€/MWh]</b>	<b>Limite [€/MWh]</b>	<b>Volume [kWh]</b>	<b>Limite Volume mínimo [kWh]</b>	<b>Limite Volume máximo [kWh]</b>
1	41,92	49,83	84,51	57,46	113,24
2	42,42	50,43	114,14	77,62	152,95
3	58,96	70,10	327,21	222,50	438,46
4	55,01	65,40	249,70	169,79	334,59
5	49,67	59,06	127,83	86,92	171,29
6	47,64	56,64	132,34	89,99	177,34

**Tabela 5.7:** Parâmetros referentes aos casos de estudo.

Parâmetro	Caso 1 (%)	Caso 2 (%)
$\delta_{inicial}$	0,5	0,5
$\delta_{final}$	1,0	5,0
$\Delta_p$	0,025	0,035
$\delta_m$	0,025	0,03
$\Delta_v$	0,035	0,045

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos com o simulador SIMEPAC. É de salientar, que os resultados dizem respeito à negociação iniciada pelo agente vendedor. Posteriormente, serão analisados os resultados, por forma a verificar o desempenho das estratégias desenvolvidas. Nesta análise, será dedicada especial atenção ao funcionamento da estratégia adoptada pelo consumidor final (que descreve as acções do lado da procura, nomeadamente da PAC), por forma a averiguar o comportamento do consumidor em resposta aos períodos em que os preços propostos pelo agente retalhista são elevados.

#### 5.4.4.1 Caso de Estudo 1

Utilizando os valores relativos à pré-negociação, apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.5, referentes ao agente vendedor *Retail Energy Service*, e ao consumidor *ElectroCenter*, do tipo comercial, procedeu-se à simulação do primeiro caso prático. Como referido na Subsecção 5.2.2.1, a estratégia do agente vendedor é constituída por dois critérios, que permitem escolher a melhor proposta: Critério da Distância Vectorial (DV) e Máximo Benefício (MB). A Figura 5.7 apresenta os resultados obtidos para o retalhista, utilizando o critério MB (o Anexo C apresenta os resultados obtidos segundo o critério DV).

#### Análise de Resultados

A Figura 5.8 apresenta a evolução do processo negocial. Verifica-se que os agentes alcançaram um acordo dentro do limite máximo considerado (7 propostas), após o agente vendedor ter enviado três propostas e o agente comprador duas. O agente vendedor iniciou a negociação enviando os seus preços iniciais, para os volumes de energia apresentados pelo agente comprador. Durante a negociação, constata-se que o agente comprador ajusta o seu perfil de consumo em resposta aos preços enviados pelo agente vendedor, e simultaneamente define novos preços, de acordo com os novos volumes (1ª e 2ª proposta do agente comprador). Por outro lado, também se constata que o agente

```

*****
                        STARTING NEGOTIATION
*****
Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 44,67€/MWh  Energy 1 = 48,45kWh
                        Price 2 = 47,39€/MWh  Energy 2 = 55,47kWh
                        Price 3 = 58,87€/MWh  Energy 3 = 82,54kWh
                        Price 4 = 56,70€/MWh  Energy 4 = 82,66kWh
                        Price 5 = 42,66€/MWh  Energy 5 = 71,08kWh
                        Price 6 = 56,88€/MWh  Energy 6 = 60,69kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 39,10€/MWh  Energy 1 = 64,44kWh
                        Price 2 = 41,48€/MWh  Energy 2 = 72,72kWh
                        Price 3 = 51,54€/MWh  Energy 3 = 56,13kWh
                        Price 4 = 49,64€/MWh  Energy 4 = 70,21kWh
                        Price 5 = 37,35€/MWh  Energy 5 = 93,83kWh
                        Price 6 = 49,80€/MWh  Energy 6 = 41,27kWh

Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 44,45€/MWh  Energy 1 = 64,44kWh
                        Price 2 = 46,70€/MWh  Energy 2 = 72,72kWh
                        Price 3 = 58,71€/MWh  Energy 3 = 56,13kWh
                        Price 4 = 54,41€/MWh  Energy 4 = 70,21kWh
                        Price 5 = 40,29€/MWh  Energy 5 = 93,83kWh
                        Price 6 = 54,56€/MWh  Energy 6 = 41,27kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 41,83€/MWh  Energy 1 = 64,44kWh
                        Price 2 = 44,39€/MWh  Energy 2 = 72,72kWh
                        Price 3 = 55,15€/MWh  Energy 3 = 56,13kWh
                        Price 4 = 53,11€/MWh  Energy 4 = 66,71kWh
                        Price 5 = 39,97€/MWh  Energy 5 = 93,83kWh
                        Price 6 = 53,28€/MWh  Energy 6 = 44,77kWh

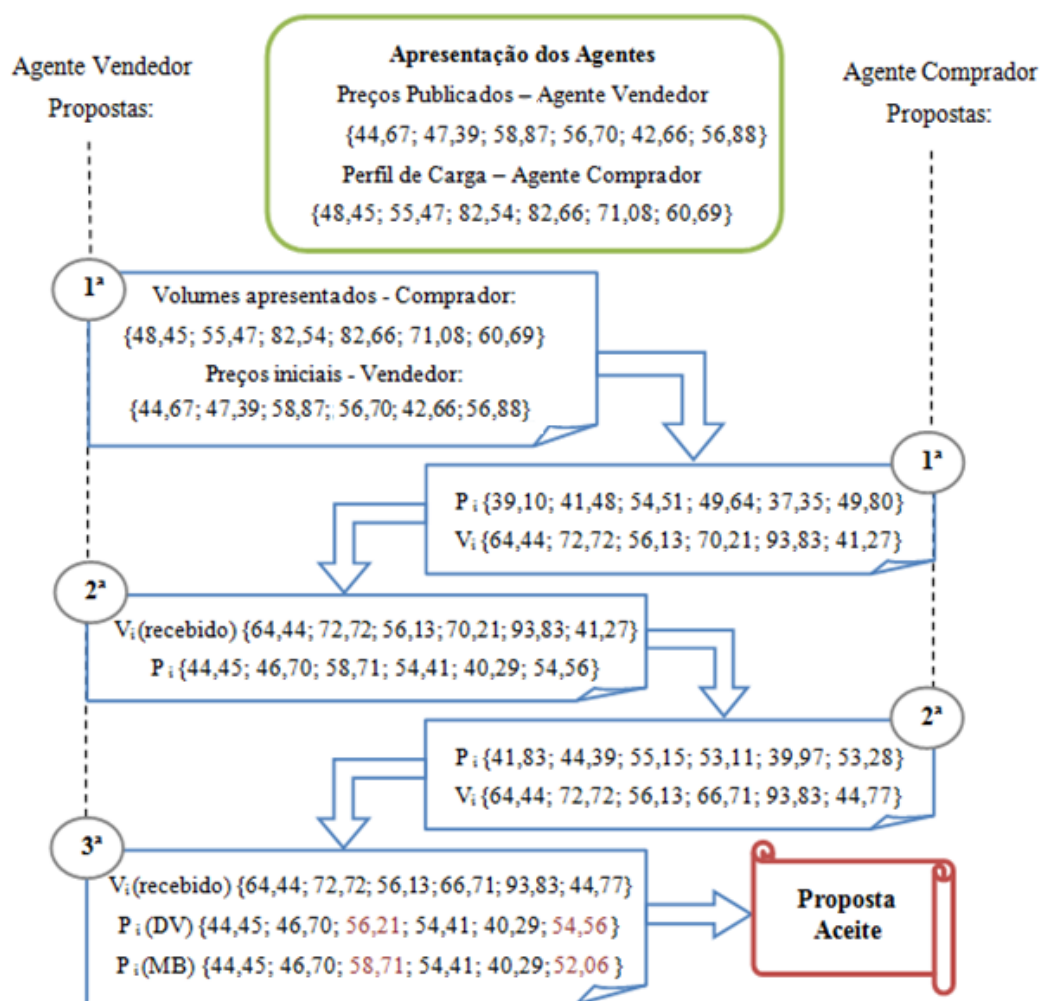
Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 44,45€/MWh  Energy 1 = 64,44kWh
                        Price 2 = 46,70€/MWh  Energy 2 = 72,72kWh
                        Price 3 = 58,71€/MWh  Energy 3 = 56,13kWh
                        Price 4 = 54,41€/MWh  Energy 4 = 66,71kWh
                        Price 5 = 40,29€/MWh  Energy 5 = 93,83kWh
                        Price 6 = 52,06€/MWh  Energy 6 = 44,77kWh
*****
                        TERMINATING NEGOTIATION
*****
Received ACCEPT Proposal: Price 1 = 44,45€/MWh  Energy 1 = 64,44kWh
                        Price 2 = 46,70€/MWh  Energy 2 = 72,72kWh
                        Price 3 = 58,71€/MWh  Energy 3 = 56,13kWh
                        Price 4 = 54,41€/MWh  Energy 4 = 66,71kWh
                        Price 5 = 40,29€/MWh  Energy 5 = 93,83kWh
                        Price 6 = 52,06€/MWh  Energy 6 = 44,77kWh

```

**Figura 5.7:** Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério MB (Caso de estudo 1).

vendedor, ao receber a oferta do opositor, efectua a gestão dos seus preços (2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> proposta do agente vendedor). A negociação termina quando o agente comprador aceita a terceira proposta do agente vendedor. Verifica-se também que os preços da terceira proposta variam com o critério de procura da solução óptima (período 3:  $P_{3DV} = 56,21$  €/MWh,  $P_{3MB} = 58,71$  €/MWh; período 6:  $P_{6DV} = 54,56$  €/MWh,  $P_{6MB} = 52,06$  €/MWh). A evolução da 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> propostas do agente vendedor resulta da estratégia de “Gestão de Preço”, e a evolução da 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> propostas do agente comprador resulta da estratégia de “Gestão de Volume”.

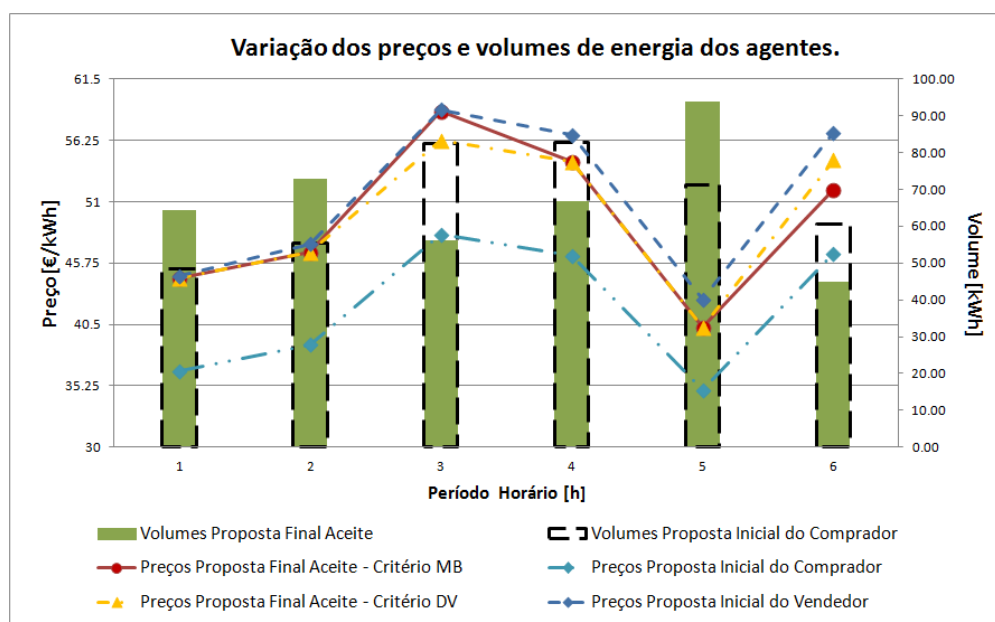
A Figura 5.9 apresenta graficamente a variação dos preços e volumes de energia dos agentes. Nesta figura, nota-se que os preços da proposta final do agente vendedor, para os volumes de energia recebidos do agente comprador, diminuíram em relação à proposta inicial. Para ambos os critérios, as reduções de preços são menores para os períodos 1 (-0,22 €/MWh), 2 (-0,69 €/MWh) e 3 (-0,16 €/MWh: segundo o critério MB). As reduções são maiores para os períodos 3 (-2,29 €/MWh: segundo o critério DV), 4 (-2,29 €/MWh: ambos os critérios), 5 (-2,37 €/MWh: ambos os critérios) e 6



**Figura 5.8:** Evolução do processo negocial (Caso de estudo 1).

(-2,32 €/MWh: pelo critério DV e -4,82 €/MWh: segundo o critério MB). O conjunto dos seis preços que constituem a proposta final é o conjunto para o qual o benefício do agente vendedor é máximo. No entanto, o benefício do agente vendedor é maior para o conjunto de preços determinado pelo critério MB (27832,22 €), em relação ao conjunto obtido através do critério DV (2754,82 €). Neste caso, verifica-se que a diferença entre os benefícios não é significativa, sendo que ambos os critérios estão de acordo com o objectivo do agente vendedor, que é maximizar o benefício. Contudo, o critério DV pode não ser o mais adequado para propostas com perfis de carga superiores, como se irá verificar na análise do segundo caso de estudo.

Da Figura 5.9, verifica-se também que o perfil de carga final do agente comprador variou em relação ao perfil inicial. Como as prioridades foram atribuídas indirectamente aos volumes e aos preços de energia (os valores mais elevados apresentam uma maior importância), observa-se que o agente comprador transferiu as quantidades de energia de maior importância, referentes aos preços elevados apresentados pelo agente vendedor, para as horas em que o preço deste é menor. Para simplificar a análise do compor-



**Figura 5.9:** Variação dos preços e volumes de energia dos agentes (Caso de estudo 1.)

tamento do agente comprador, apresenta-se na Tabela 5.8 as quantidades transferidas por ordem de importância, em relação aos volumes iniciais. Nesta tabela verifica-se que as quantidades são transferidas dos períodos horários 3, 6 e 4 para as restantes horas de menor preço (períodos 1, 2 e 5). Constata-se que nos períodos de menor preço, os volumes de energia atingiram o seu limite máximo, bem como no período 3 o volume atingiu o seu valor mínimo. A soma total de energia para o conjunto final de volumes (398,60 kWh) manteve-se no intervalo próximo ao consumo total inicial (400,88 kWh). O conjunto final de seis volumes é o conjunto para qual o custo do agente comprador é mínimo.

**Tabela 5.8:** Quantidades transferidas por ordem de importância (Caso de estudo 1).

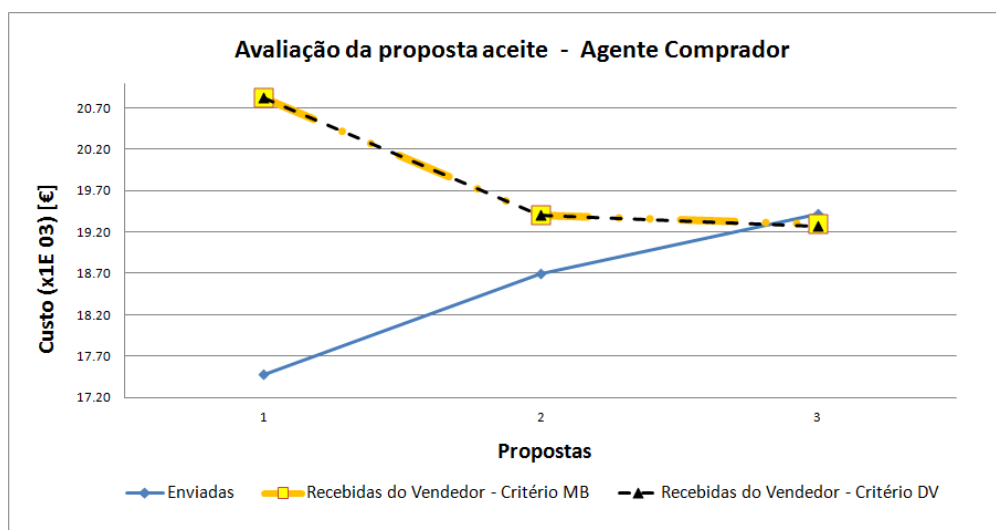
Importância	Período Horário	Transferido [kWh]
1	3	-26,41
2	6	-15,92
3	4	-15,95
4	2	+17,25
5	1	+15,99
6	5	+22,75

**Tabela 5.9:** Valores de custo das propostas enviadas e recebidas pelo agente comprador (Caso de estudo 1.)

Custos [€]	1 <sup>a</sup> Proposta	2 <sup>a</sup> Proposta	3 <sup>a</sup> Proposta
Propostas recebidas (DV)	20823,42	19408,00	19268,20
Propostas recebidas (MB)	20823,42	19408,00	19296,60
Propostas enviadas	17473,99	18697,83	19418,26

A Tabela 5.9 apresenta os valores de custo do agente comprador. Antes de os agentes decidirem aceitar uma proposta ou enviar uma contraproposta, realizam uma avaliação de benefício/custo. Seguidamente, comparam estes valores e verificam quais os mais vantajosos. Observa-se que o valor do custo da terceira proposta a enviar pelo agente comprador é superior ao valor do custo da terceira proposta recebida pelo agente vendedor. Desta forma, o agente comprador decide não enviar uma contraproposta e aceitar a última proposta recebida.

A Figura 5.10 apresenta graficamente a avaliação da proposta aceite pelo agente comprador. Analisando esta figura, verifica-se que a partir do momento em que o valor do custo da proposta recebida pelo agente vendedor for superior ao valor do custo da proposta a enviar pelo agente comprador, o agente decide aceitar a proposta. No caso em estudo, esta situação aconteceu na terceira proposta recebida pelo agente comprador.



**Figura 5.10:** Avaliação da proposta aceite pelo agente comprador (Caso de estudo 1.)



#### 5.4.4.2 Caso de Estudo 2

Neste caso de estudo foram utilizados os valores das Tabelas 5.4 e 5.6, referentes ao agente vendedor *Retail Energy Service*, e ao consumidor *TechnoIndustry*, do tipo industrial. De forma análoga ao primeiro caso de estudo, foram aplicados os critérios DV e MB de selecção da solução óptima, referentes à estratégia do agente vendedor. A Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos para o agente retalhista, segundo o critério MB (O Anexo C apresenta os resultados segundo o critério DV).

É de salientar que a estratégia de “Gestão de Volume” pode ser restritiva para inúmeros consumidores industriais, pois poderá não trazer proveito, visto que ao realizar a transferência de carga, estes terão que remarcar o funcionamento de alguns equipamentos necessários à produção. No entanto, foi considerado que no presente caso prático tal não acontece.

```

*****
STARTING NEGOTIATION
*****
Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 51,23€/MWh Energy 1 = 84,51kWh
                        Price 2 = 51,85€/MWh Energy 2 = 114,14kWh
                        Price 3 = 72,07€/MWh Energy 3 = 327,21kWh
                        Price 4 = 67,23€/MWh Energy 4 = 249,70kWh
                        Price 5 = 60,71€/MWh Energy 5 = 127,83kWh
                        Price 6 = 58,23€/MWh Energy 6 = 132,34kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 44,85€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                           Price 2 = 45,39€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                           Price 3 = 63,09€/MWh Energy 3 = 222,50kWh
                           Price 4 = 58,86€/MWh Energy 4 = 210,22kWh
                           Price 5 = 53,15€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                           Price 6 = 50,97€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 49,38€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                        Price 2 = 49,89€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                        Price 3 = 70,12€/MWh Energy 3 = 222,50kWh
                        Price 4 = 66,12€/MWh Energy 4 = 210,22kWh
                        Price 5 = 57,23€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                        Price 6 = 55,17€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

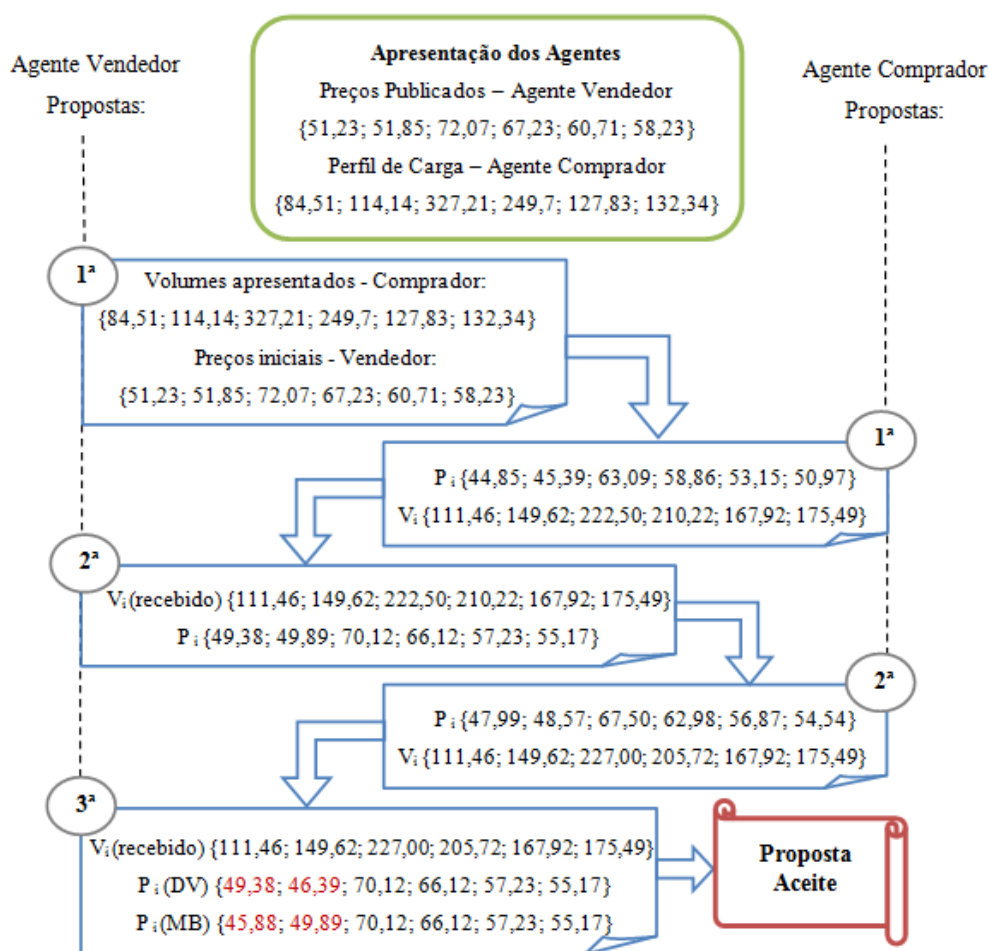
Received Proposal to buy at: Price 1 = 47,99€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                           Price 2 = 48,57€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                           Price 3 = 67,50€/MWh Energy 3 = 227,00kWh
                           Price 4 = 62,98€/MWh Energy 4 = 205,72kWh
                           Price 5 = 56,87€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                           Price 6 = 54,54€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 45,88€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                        Price 2 = 49,89€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                        Price 3 = 70,12€/MWh Energy 3 = 227,00kWh
                        Price 4 = 66,12€/MWh Energy 4 = 205,72kWh
                        Price 5 = 57,23€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                        Price 6 = 55,17€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

*****
TERMINATING NEGOTIATION
*****
Received ACCEPT Proposal: Price 1 = 45,88€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                        Price 2 = 49,89€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                        Price 3 = 70,12€/MWh Energy 3 = 227,00kWh
                        Price 4 = 66,12€/MWh Energy 4 = 205,72kWh
                        Price 5 = 57,23€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                        Price 6 = 55,17€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

```

**Figura 5.11:** Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério MB (Caso de estudo 2).

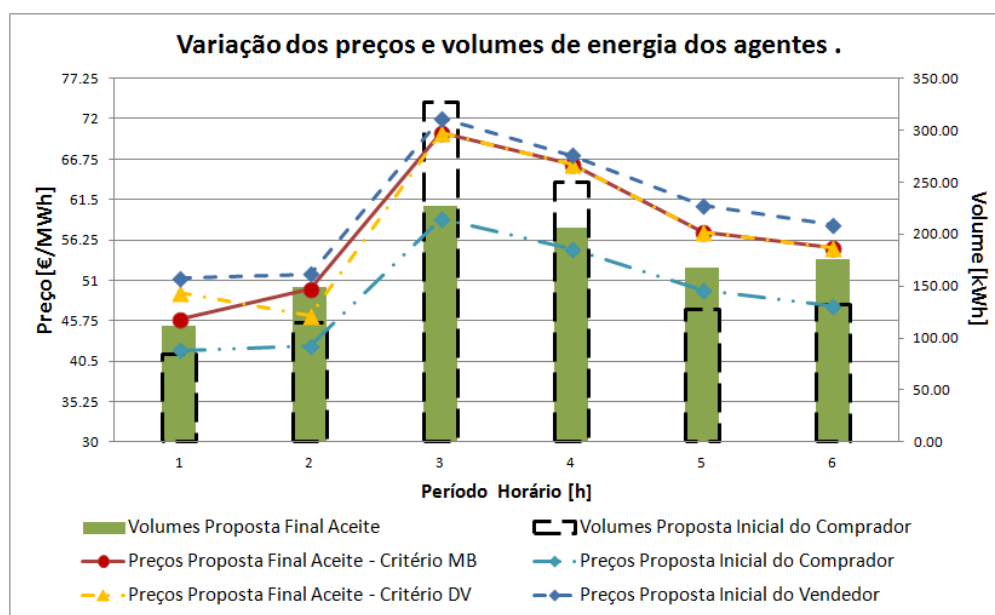


**Figura 5.12:** Evolução do processo negocial (Caso de estudo 2).

## Análise de Resultados

A Figura 5.12 apresenta a evolução do processo negocial. Verifica-se que o acordo entre os agentes é alcançado após o agente vendedor ter enviado três propostas, e o agente comprador duas, sem exceder o limite máximo de 7 propostas. Consta-se que a evolução do processo negocial é semelhante ao do cenário anterior. A negociação termina quando o agente comprador aceita a terceira proposta do agente vendedor. Verifica-se que os preços incluídos nesta proposta também variam com o critério de procura da solução ótima (período 1:  $P_{1DV} = 49,38 \text{ €/MWh}$ ,  $P_{1MB} = 45,88 \text{ €/MWh}$ ; período 2:  $P_{2DV} = 46,39 \text{ €/MWh}$ ,  $P_{2MB} = 49,89 \text{ €/MWh}$ ).

A Figura 5.13 apresenta graficamente a variação dos preços e volumes de energia dos dois agentes. Da análise da figura verifica-se uma diminuição dos preços da proposta final do agente vendedor em relação à proposta inicial. Esta diminuição é menos significativa para os períodos 1 (-1,85 €/MWh: segundo o critério DV), 2 (-1,96 €/MWh: pelo critério MB), 3 (-1,95 €/MWh: ambos os critérios) e 4 (-1,11 €/MWh: ambos os critérios). As reduções mais significativas verificam-se para os períodos 1 (-5,35 €/MWh: pelo critério MB), 2 (-5,46 €/MWh: segundo o critério DV), 5 (-3,48



**Figura 5.13:** Variação dos preços e volumes de energia dos agentes (Caso de estudo 2).

€/MWh: ambos os critérios) e 6 (-3,06 €/MWh: ambos os critérios). O conjunto final de seis preços é o conjunto para o qual o benefício do agente vendedor é máximo. No entanto, o benefício do agente vendedor é maior para os conjuntos de preços determinados através do critério MB (8385,48 €), em relação aos conjuntos obtidos através do critério DV (8251,92 €). Neste caso, pode-se tirar a conclusão que através do critério MB os conjuntos de preços determinados são melhores para o agente vendedor, cujo objectivo é obter um valor máximo do benefício.

Observa-se também, da Figura 5.13, que o perfil de carga final do agente comprador (para a oferta de preços do agente vendedor) variou em relação ao perfil inicial. Verifica-se que o agente comprador transferiu as quantidades de energia de maior importância, referentes aos preços elevados apresentados pelo agente vendedor, para as horas em que o preço deste é menor. A Tabela 5.10 apresenta as quantidades de energia transferidas dos períodos de preços elevados, por ordem de importância. Nesta tabela, verifica-se que as quantidades de energia são transferidas dos períodos horários 3 e 4 para as restantes horas (período 1, 2, 5 e 6). Constata-se que, para a transferência realizada, a soma total de energia do conjunto final de volumes (1037,21 kWh) manteve-se no intervalo próximo definido ao consumo total inicial (1035,73 kWh). Nota-se que nos períodos 1, 2, 5 e 6 (para um intervalo de procura de volume  $\Delta_v = 4,5$ ), as quantidades de energia atingiram o seu limite máximo, bem como no período 3 a quantidade de energia atingiu o seu valor mínimo. Conclui-se que para esta distribuição de energia o conjunto final de seis volumes é o conjunto para o qual o custo do agente comprador é mínimo.

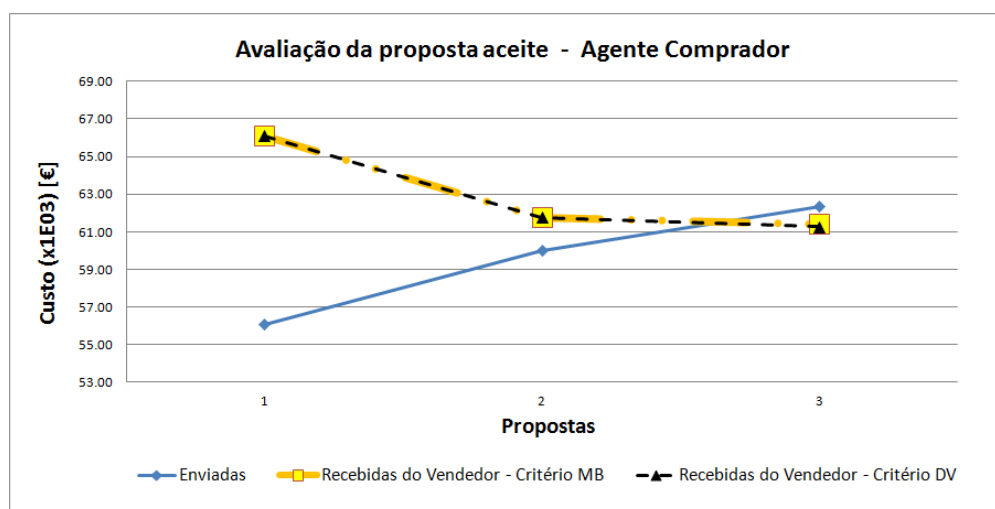
**Tabela 5.10:** Quantidades transferidas por ordem de importância (Caso de estudo 2).

Importância	Período Horário	Transferido [kWh]
1	3	-100,21
2	4	-43,98
3	5	+40,09
4	6	+43,15
5	2	+35,48
6	1	+26,95

**Tabela 5.11:** Valores de custo das propostas enviadas e recebidas pelo agente comprador (Caso de estudo 2).

Custos [€]	1 <sup>a</sup> Proposta	2 <sup>a</sup> Proposta	3 <sup>a</sup> Proposta
Propostas recebidas (DV)	66082,58	61761,73	61256,06
Propostas recebidas (MB)	66082,58	61761,73	61389,62
Propostas enviadas	56070,98	60015,59	62344,44

A Tabela 5.11 apresenta os valores de custo do agente comprador até este agente decidir aceitar a proposta do agente vendedor. Tal como acontece no primeiro caso de estudo, a avaliação das propostas é realizada conforme descrito na Subsecção 5.2.2.2. Verifica-se que o valor do custo da terceira proposta a enviar pelo agente comprador é maior do que o valor do custo da segunda e terceira propostas recebidas pelo agente vendedor, sendo por isso que o agente comprador decide não enviar uma contraproposta e aceitar a última proposta recebida. A Figura 5.14 apresenta graficamente a avaliação da proposta aceite pelo agente comprador.



**Figura 5.14:** Avaliação da proposta aceite pelo agente comprador (Caso de estudo 2).

## 5.5 Conclusões

Neste capítulo, apresentou-se o simulador desenvolvido, denominado por SIMEPAC: Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores, e descreveu-se o seu funcionamento através de dois casos práticos. O primeiro caso prático envolveu um agente retalhista e um consumidor do tipo comercial, designados por *Retail Energy Service* e *ElectroCenter*. O segundo caso prático envolveu o mesmo agente retalhista e um consumidor do tipo industrial, denominado por *TechnoIndustry*.

Seguidamente, realizou-se a análise dos resultados obtidos e verificou-se o desempenho das estratégias desenvolvidas. Verificou-se que os casos de estudo conduzem a valores aceitáveis, nomeadamente valores que maximizam o benefício do agente vendedor e minimizam o custo do agente comprador.

Constatou-se que a estratégia de “Gestão de Volume” (que descreve a acção de PAC) possibilita ao agente realizar uma gestão do seu consumo de energia, transferindo as quantidades de energia dos períodos horários em que o preço de electricidade é elevado, para os restantes períodos. O agente comprador mostrou ser capaz de entrar numa negociação bilateral e negociar volumes e preços de energia, realizando um acordo favorável.

Concluiu-se também que as estratégias desenvolvidas para cada agente não são específicas só a um tipo de consumidor, podendo serem aplicadas a vários tipos de consumidores.



---

## Capítulo 6

# Conclusões e Desenvolvimento Futuro

---

Este capítulo apresenta as conclusões mais importantes que resultam do trabalho desenvolvido e descreve o grau de realização dos principais objectivos propostos para a presente dissertação. São também apresentadas algumas perspectivas de desenvolvimento futuro.

## 6.1 Síntese dos Resultados

A liberalização do sector eléctrico permitiu aumentar a competitividade das empresas nas actividades de produção e comercialização, e consequentemente a sua eficiência. O processo de reestruturação do sector levou à implementação de um mercado grossista, onde actuam os produtores que fornecem energia aos retalhistas presentes na comercialização de electricidade. Além disso, foi também implementado um mercado retalhista, onde os retalhistas asseguram o fornecimento de energia aos consumidores finais. Nos Mercados de Energia Eléctrica (MEE) liberalizados, os consumidores finais podem escolher livremente o seu comercializador de energia. Os consumidores finais tendem a contratar energia a comercializadores que lhes ofereçam preços mais baixos e maiores garantias de fiabilidade e qualidade de serviço.

Após a reestruturação do sector eléctrico, surgiram vários modelos para a estrutura do mercado, tais como: bolsa ou *pool*, contratos bilaterais e mistos. No mercado em bolsa incluem-se os mecanismos de curto prazo, em que se pretende equilibrar a produção e o consumo. Este mercado baseia-se em licitações de ofertas de preços e volumes, sendo que a intersecção das curvas de oferta e de procura estabelece o preço de mercado. O modelo de contratos bilaterais permite realizar transacções directamente entre duas entidades interessadas, em que os preços, os termos e as condições são negociados livremente. O mercado misto combina os dois modelos anteriores.

Devido às mudanças que o sector eléctrico tem sofrido, como a liberalização dos mercados de energia nos países mais desenvolvidos, a filosofia de funcionamento do sistema também foi alterada. Actualmente, existe cada vez mais a necessidade de adopção de medidas do lado da procura de energia, que dizem respeito aos conceitos de conservação, gestão e utilização racional de energia. Neste sentido, têm vindo a ser desenvolvidos programas de Participação Activa dos Consumidores (PAC), que têm como objectivo alterar os padrões de consumo por parte dos utilizadores do sector eléctrico.

A simulação de MEE com base em agentes de *software* é uma técnica em grande expansão, que tem visto uma série de aplicações práticas nos últimos anos. Estes simuladores são basicamente imitações do mercado real e permitem auxiliar os intervenientes neste mercado na tomada de decisões. As ferramentas de simulação ganharam relevância após a liberalização, existindo actualmente diversos simuladores com aplicações no âmbito do mercado eléctrico. No presente trabalho foram apresentadas algumas ferramentas multi-agente de MEE, evidenciando-se o MASCEM, EMCAS, SEPIA, SCBE e SMEE. As ferramentas SCBE e SMEE foram utilizadas como referência para o desenvolvimento do simulador SIMEPAC: Simulador de Mercado de Electricidade com Participação Activa dos Consumidores.



O principal objectivo desta dissertação foi o desenvolvimento de um novo simulador SIMEPAC, que inclui estratégias de negociação para a compra de energia eléctrica por parte dos consumidores finais. Este simulador apresenta uma nova *interface* de utilização e integra duas áreas, nomeadamente o mercado eléctrico e os sistemas multi-agente. O SIMEPAC foi desenvolvido através da linguagem de programação JAVA e a plataforma de desenvolvimento multi-agente JADE. O seu principal objectivo consiste em auxiliar o utilizador no apoio à decisão, através da análise do comportamento dos agentes no MEE, nomeadamente no que diz respeito à contratação bilateral de energia.

As estratégias de negociação têm como objectivo maximizar o benefício dos agentes retalhistas e minimizar o custo dos consumidores finais de electricidade. A estratégia referente ao agente retalhista, denominada por “Gestão de Preço”, permite realizar uma gestão de preços com base na oferta de volumes de energia propostos pelo consumidor final. A estratégia do consumidor final, designada por “Gestão de Volume”, foi desenvolvida com o objectivo de possibilitar aos consumidores uma participação mais activa no MEE, e permitir ao agente comprador negociar volumes de energia obtidos através da técnica de PAC. A gestão de volumes foi realizada com base nas propostas de preços enviadas pelo agente vendedor.

A aplicação do SIMEPAC a dois casos práticos permitiu ilustrar o seu funcionamento e o desempenho das estratégias de negociação. Os cenários analisados envolveram uma contratação bilateral de energia eléctrica entre um agente retalhista (*Retail Energy Service*) e dois consumidores de energia, do tipo comercial (*ElectroCenter*) e industrial (*TechnoIndustry*). Foram considerados seis preços para o consumo de energia eléctrica, obtidos com base em valores reais de compra e venda de energia, e seis volumes, calculados com base em perfis de cargas reais. A duração do contrato foi estabelecida em seis meses.

A análise dos resultados obtidos permitiram verificar que os agentes retalhista e consumidor obtêm valores expectáveis, nomeadamente valores que maximizam o benefício do agente vendedor e minimizam o custo do agente comprador. Constatou-se que a estratégia de “Gestão de Volume” (referente ao agente comprador) possibilita realizar uma gestão de consumo de energia, transferindo quantidades de energia dos períodos horários, em que o preço de electricidade é elevado, para os restantes períodos.

Estes resultados permitiram concluir que o simulador SIMEPAC possibilita simular uma negociação de contratos bilaterais entre dois agentes do mercado, considerando-se desta forma uma ferramenta útil, que permite apoiar a tomada de decisões dos intervenientes no MEE.

## 6.2 Desenvolvimento Futuro

Em termos de trabalho futuro, existem muitas linhas de desenvolvimento que podem ser seguidas, pois o tempo disponível para o desenvolvimento do simulador SIMEPAC não permitiu abordar todos os aspectos inerentes à complexidade dos mercados de energia liberalizados. Algumas das linhas a seguir seriam:

- **Preferências dos agentes** – seria interessante incluir mais modelos que avaliem as preferências de cada agente, para além do modelo aditivo que o programa possui, por forma a permitir uma maior diversidade e flexibilidade da simulação;
- **Estratégias de negociação** – desenvolver novas estratégias relacionadas com as acções de PAC, incluindo outros tipos de programas (descritos no Capítulo 2 do presente trabalho), de modo a possibilitar ao consumidor final de energia escolher entre várias opções a que se adequa melhor ao seu tipo de consumo. No entanto, para implementação de algumas destas estratégias, seria necessário recorrer aos mercados em bolsa, mistos, entre outros, sendo esta uma outra linha a seguir, pois permitia simular outros tipos de mercados, além dos contratos bilaterais. Ainda neste contexto, uma outra opção seria incluir na negociação bilateral os incentivos monetários fornecidos aos consumidores finais para realizarem uma redução do seu consumo, e as respectivas penalizações caso não sejam respeitados os termos contratuais;
- **Novas funções objectivo** – definir outras funções objectivo (mais genéricas), de forma a estudar a interacção destas estratégias com outras que envolvam volumes de energia. Também seria interessante analisar a interacção destas estratégias do ponto de vista estatístico, através de um teste de hipóteses, que permitiria decidir com base nos resultados experimentais, quais as melhores para situações específicas;
- **Novas entidades do mercado** – a introdução de novas entidades do mercado seria outra linha a seguir, pois alargaria o domínio de utilização do simulador, permitindo uma simulação mais próxima à real. Por exemplo, poderia ser desenvolvida uma ligação a um operador de sistema, que verificaria as limitações da rede de transporte do acordo negocial realizado através da contratação bilateral, e indicaria se este é realizável ou não. No entanto, para este desenvolvimento seria necessário ter em conta a informação referente aos elementos de uma rede de energia, tais como, as cargas, linhas, barramentos, e algoritmos, que permitam a análise do trânsito de potências da rede.

# Bibliografia

- Albadi, M. e El-Saadany, E. (2007), Demand Response in Electricity Markets: An Overview, IEEE.
- Apolinário, I., Felizardo, N., Leite Garcia, A., Oliveira, P., Trindade, A., e Verdelho, P. (2006), Criteria for the Assessment of Demand Side Management Measures in the Context of Electricity Sector Regulation, Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- Azevedo, F. (2002), Apoio à Decisão para o Estabelecimento de Contratos no Mercado Competitivo da Electricidade, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Azevedo, F. (2007), Gestão do Risco em Mercados Competitivos de Electricidade: Previsão de Preços e Optimização do *Portfolio* de Contratos, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharias, Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Bellifemine, F., Caire, G., e Greenwood, D. (2007), Developing Multi-Agent Systems with JADE, John Wiley & Sons, Ltd.
- Borenstein, S. (2005), The Long-Run Efficiency of Real-Time Electricity Pricing, Center for the Study of Energy Markets, University of California Energy Institute, UC Berkeley.
- Cappers, P., Goldman, C., e Kathan, D. (2010), Demand Response in U.S. Electricity Markets: Empirical Evidence, Energy, vol.35, pp.1526–1535.
- CRA (2005), Charles River Associates, Primer on Demand-Side Management with an Emphasis on Price-Responsive Programs, Report prepared for The World Bank, Washington, DC.
- DRE (2010), Diário da Republica Electrónico, Portaria n.º 592/2010, Ministério da Economia da Inovação e do Desenvolvimento.

- EDP (2012), Energias de Portugal Serviço Universal, Extinção das Tarifas Reguladas de Electricidade, Disponível em: [www.edpsu.pt](http://www.edpsu.pt), Último acesso: 03 de Agosto de 2012.
- ERSE (2009), Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Descrição do Funcionamento do MIBEL, Trabalho realizado pelo Conselho de Reguladores do MIBEL.
- ERSE (2012a), Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Comercializadores em Regime de Mercado, Disponível em: [www.erse.pt/pt/electricidade/agentesdosector](http://www.erse.pt/pt/electricidade/agentesdosector), Último acesso: 15 de Setembro de 2012.
- ERSE (2012b), Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Liberalização do Sector Eléctrico, Disponível em: [www.erse.pt/pt/electricidade/liberalizacaodosector](http://www.erse.pt/pt/electricidade/liberalizacaodosector), Último acesso: 15 de Setembro de 2012.
- Faria, P. (2011), Demand Response in Future Power Systems Management – A Conceptual Framework and Simulation Tool, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- FERC (2008), Federal Energy Regulatory Commission, Assessment of Demand Response and Advanced Metering, Staff Report.
- Ferreira, M. (2007), Tarificação da Transmissão e Gestão do Congestionamento em Sistemas Eléctricos Liberalizados, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharias, Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- FEUP (2011), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Gestão Activa da Procura, Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt>, Último acesso: 08 de Dezembro de 2011.
- Giunta, F e Gatti, N. (2007), Bargaining over Multiple Issues in Finite Horizon Alternating-Offers Protocol, Springer Science+Business Media B.V.
- Gomes, B. (2005), Simulador dos Operadores de Mercado e de Sistema num Mercado de Energia Eléctrica considerando Restrições Intertemporais, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Goodwin, P. e Wright, G. (2004), Decision Analysis for Management Judgment, 3<sup>a</sup> Ed., John Wiley & Sons, Ltd.

- 
- Gulich, O. (2010), Technological and Business Challenges of Smart Grids, Aggregator's Role in Current Electricity Market, Dissertação de Mestrado, Lappeenranta University of Technology.
- Harp, S., Brignone, S., Wollenberg, B., e Samad, T. (2000), SEPIA A Simulator for Electric Power Industry Agents, IEEE Control System Magazine.
- JADE (2011), Java Agent DEvelopment Framework, Informação plataforma de desenvolvimento multi-agente JADE, Disponível em: <http://jade.tilab.com>, Último acesso: 05 de Dezembro de 2011.
- Jennings, N., Sycara, K., e Wooldridge, M. (1998), A Roadmap of Agent Research and Development, Kluwer Academic Publishers, Boston, vol.1, pp.275–306.
- Kiliccote, S., Piette, M., Watson, D., e Hughes, G. (2006), Dynamic Controls for Energy Efficiency and Demand Response: Framework Concepts and a New Construction Case Study in New York, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
- Lopes, F. (2004), Negociação entre Agentes Computacionais Autónomos, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Lopes, F., Sousa, J., e Coelho, H. (2010), Negotiation and Risk Management in Multi-Agent Energy Markets, Relatório Interno, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Portugal.
- Lopes, F. e Coelho, H. (2010), Strategic and Tactical Behaviour in Automated Negotiation, International Journal of Artificial Intelligence, vol.4, pp.1–44.
- MIBEL (2012), Mercado Ibérico de Electricidade, Relatórios mensais do MIBEL, Disponível em: [www.mibel.com](http://www.mibel.com), Último acesso: 01 de Agosto de 2012.
- Morais, H. (2010), Gestão de Recursos Energéticos nas SmartGrids, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- NYSEG (2012), New York State Electric & Gas, Load Profiles, Disponível em: [www.nyseg.com](http://www.nyseg.com), Último acesso: 10 de Junho de 2012.
- OMIE (2012), Operador del Mercado Ibérico de Energia – Pólo Español, Preço horário do mercado diário, Disponível em: [www.omie.es](http://www.omie.es), Último acesso: 10 de Junho de 2012.
- OMIP (2012), MIBEL – Mercado Ibérico de Electricidade, Disponível em: [www.omip.pt](http://www.omip.pt), Último acesso: 11 de Abril de 2012.

- Paiva, J. (2007), Redes de Energia Eléctrica – Uma Análise Sistémica, 2ª Ed., IST Press, Lisboa, Portugal.
- Pereira, B. (2011), Contratos Bilaterais em Mercados Multi-Agente de Energia Eléctrica: Protocolo de Ofertas Alternadas, Dissertação de Mestrado, Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Pereira, I. (2004), Sistema Multi-Agente para Apoio à Negociação em Mercados de Electricidade, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharias, Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Praça, I., Ramos, C., Vale, Z., e Cordeiro, M. (2003), MASCEM: A Multiagent System that Simulates Competitive Electricity Markets, IEEE Computer Society.
- Rodrigues, T. (2011), Estratégias para Negociação de Contratos Bilaterais em Mercados Multi-Agente de Energia Eléctrica, Dissertação de Mestrado, Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Russell, S. e Norving, P. (2003), Artificial Intelligence: A Modern Approach, Prentice-Hall, Inc.
- Savich, W. (2005), JAVA An Introduction to Problem Solving and Programming, 4ª Ed., Pearson Prentice Hall.
- Shahidehpour, M., Yamin, H., e Li, Z. (2002), Market Operations in Electric Power Systems Forecasting, Scheduling, and Risk Management, IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers, John Wiley & Sons Publication, Inc., New York.
- Taqqali, W. e Abdulaziz, N. (2010), Smart Grid and Demand Response Technology, IEEE International Energy Conference.
- Torriti, J., Hassan, M., e Leach, M. (2009), Demand Response Experience in Europe: Policies, Programmes and Implementation, Energy.
- USDE (2006), US Department of Energy, Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them, A Report to the United States Congress.
- USDE (2012), U.S. Department of Energy, Building Energy Software Tools Directory, Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov>, Último acesso: 15 de Maio de 2012.

- Vale, Z., Ramos, C., Morais, H., Faria, P., e Silva, M. (2009), The Role of Demand Response in Future Power Systems, IEEE T&D Asia.
- Wang, J., Bloyd, C., Hu, Z., e Tan, Z. (2010), Demand Response in China, Energy, vol.35, pp.1592–1597.
- Woo, C. e Greening, L. (2010), Guest Editors' introduction, Energy, vol.35, pp.1515–1517.
- Wooldridge, M. (1999), Multi-Agent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, MIT Press, Cambridge.
- Wooldridge, M. e Jennings, N. (1995), Intelligent Agents: Theory and Practice, Knowledge Engineering Review, vol.10, pp.115–152.
- Zhou, Z., Chan, W., e Chow, J. (2009), Agent-Based Simulation of Electricity Markets: A Survey of Tools, Springer Science+Business Media B.V., vol.28, pp.305–342.





---

## Anexo A

# Preços horários do mercado diário fornecidos pelo OMIE

---

**Tabela A.1:** Preços horários do mercado diário no sistema português para o dia 05/04/2012 (OMIE, 2012).

Preço marginal no sistema português [€/MWh]	
Hora	Preço
1	49.72
2	38.65
3	37.05
4	37.00
5	36.65
6	37.00
7	45.13
8	53.54
9	51.20
10	53.54
11	55.81
12	53.54
13	53.60
14	53.54
15	50.05
16	49.00
17	40.37
18	38.20
19	36.57
20	40.00
21	49.72
22	53.20
23	53.30
24	50.62

**Tabela A.2:** Preços horários do mercado diário no sistema português para o dia 06/06/2012 (OMIE, 2012).

Preço marginal no sistema português [€/MWh]	
Hora	Preço
1	50.13
2	49.00
3	44.16
4	43.00
5	43.00
6	43.00
7	49.00
8	53.54
9	61.13
10	65.13
11	69.69
12	66.11
13	67.00
14	64.64
15	58.20
16	54.64
17	54.64
18	54.13
19	55.00
20	57.00
21	53.98
22	54.02
23	54.02
24	49.72



---

**Anexo B**

**Perfis de carga fornecidos pelo  
NYSEG**

---

Os passos realizados para obtenção dos volumes de referência dos consumidores de energia para os seis períodos horários, com base nos perfis de carga apresentados de seguida, são:

1. Calculou-se o consumo médio de energia de cada hora para cada mês, dado pela soma do volume da semana e da média aritmética dos volumes dos dias de fim de semana;
2. Posteriormente, obteve-se a soma total de energia dos períodos constituídos por quatro volumes para cada mês, de modo a obter os volumes de energia dos meses do ano para os seis períodos horários;
3. Por fim, realizou-se a média aritmética dos volumes de todos os meses para cada período de forma a obter os volumes de referência para os seis períodos horários.

Tabela B.1: Perfil de carga para um consumidor do tipo comercial (NYSEG, 2012).

Day Type Profile	Service Class 2	Rate No. 115-02-00, 115-02-06											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Season:January	DayType:Weekday	6.84946	6.58941	6.49044	6.53064	6.68746	7.05500	8.42119	10.56328	11.96742	12.68849	12.82212	12.95905
Season:January	DayType:Saturday	6.85740	6.55750	6.46490	6.34322	6.37380	6.70734	7.15534	8.02720	9.15266	9.65406	10.14484	9.98394
Season:January	DayType:Sunday	6.81968	6.71482	6.49474	6.53230	6.40546	6.63688	7.01082	7.30698	7.55630	8.07506	8.38220	8.53832
Season:February	DayType:Weekday	6.66499	6.56066	6.44760	6.50294	6.77399	7.05144	8.65967	10.59285	12.05506	12.58181	12.73120	12.88919
Season:February	DayType:Saturday	6.94983	6.69852	6.52598	6.46150	6.56265	6.83463	7.38285	8.07110	9.06330	9.75593	10.09807	9.92790
Season:February	DayType:Sunday	7.26680	6.99848	6.79760	6.74120	6.69155	6.85385	7.17648	7.35853	7.56805	7.88875	8.10175	8.32835
Season:March	DayType:Weekday	6.51956	6.36864	6.33008	6.41407	6.64989	6.91197	8.13944	10.28900	11.93412	12.56645	12.92638	13.10269
Season:March	DayType:Saturday	6.62792	6.24435	6.10955	6.14620	6.31217	6.50723	6.89288	7.65615	8.69012	9.12505	9.61312	9.76908
Season:March	DayType:Sunday	6.55960	6.38876	6.19254	6.07440	6.02008	6.23794	6.28058	6.61024	6.95518	7.53148	7.73756	7.82318
Season:April	DayType:Weekday	5.83248	5.57621	5.52019	5.45376	5.68124	5.99928	7.11494	9.12446	10.62024	11.15345	11.63695	11.78450
Season:April	DayType:Saturday	6.01013	5.69928	5.46128	5.49127	5.58647	5.78597	5.97200	6.70545	7.89510	8.20880	8.42343	8.55538
Season:April	DayType:Sunday	5.76320	5.47103	5.32813	5.29400	5.37690	5.49307	5.67620	5.90003	6.12150	6.52440	6.81217	6.77253
Season:May	DayType:Weekday	6.00713	5.60295	5.53182	5.46408	5.69334	5.83943	6.87045	9.13724	11.22586	12.20951	12.44798	12.98246
Season:May	DayType:Saturday	6.02350	5.61742	5.48852	5.40838	5.45596	5.58358	5.74856	6.64092	7.19626	8.36470	8.65098	8.74832
Season:May	DayType:Sunday	5.77225	5.59493	5.45108	5.28443	5.41867	5.36000	5.31610	5.83955	6.16815	6.62513	7.22208	7.45157
Season:June	DayType:Weekday	6.10284	5.75713	5.63262	5.54760	5.69494	5.92386	7.27405	9.37466	11.43464	11.98556	12.74598	13.32479
Season:June	DayType:Saturday	6.23073	5.93458	5.80002	5.61207	5.65395	5.73583	5.89035	6.84387	7.87598	8.37203	9.06742	9.32030
Season:June	DayType:Sunday	5.88325	5.68980	5.52510	5.33663	5.48715	5.46168	5.41080	5.97880	6.35810	6.81973	7.45165	7.87733
Season:July	DayType:Weekday	6.61390	6.27386	6.14772	6.01952	6.08934	6.46251	7.63197	9.98764	11.29945	12.46626	13.28512	13.72516
Season:July	DayType:Saturday	6.19128	5.88252	5.69602	5.61732	5.51872	5.81598	5.76717	6.91167	7.47918	8.20243	9.03137	9.15798
Season:July	DayType:Sunday	5.83750	5.66756	5.54310	5.37710	5.29124	5.41232	5.32730	6.04878	6.47476	7.15488	7.94368	8.27870
Season:August	DayType:Weekday	6.63966	6.31656	6.10830	6.04289	6.17449	6.51530	8.00545	9.41856	11.40876	12.63889	13.18237	13.89066
Season:August	DayType:Saturday	6.54658	6.12194	5.91232	5.82368	5.86190	6.04200	6.34576	7.12712	8.13526	9.30034	9.83290	10.20896
Season:August	DayType:Sunday	6.48358	6.18142	5.97242	5.85698	5.79674	5.92422	6.04012	6.29324	6.77866	7.69510	8.15682	8.54816
Season:September	DayType:Weekday	5.91789	5.75822	5.59551	5.53540	5.66854	6.08995	7.57642	9.64104	11.38447	12.52885	12.73161	13.25863
Season:September	DayType:Saturday	6.05525	5.71613	5.54290	5.45835	5.38870	5.77133	6.17585	6.82680	7.74690	8.89377	9.42890	9.73333
Season:September	DayType:Sunday	6.20574	5.85486	5.67254	5.55320	5.59720	5.74152	5.90506	6.11006	6.62562	7.55674	7.69782	8.09812
Season:October	DayType:Weekday	5.69359	5.43228	5.36702	5.31223	5.51752	5.96445	7.48189	9.64726	10.91858	11.93531	12.27859	12.43385
Season:October	DayType:Saturday	5.94392	5.55728	5.38928	5.32590	5.45206	5.75774	6.45912	7.21064	7.98092	8.75930	8.95164	9.17246
Season:October	DayType:Sunday	5.61928	5.47157	5.20765	5.11317	5.14138	5.32207	5.74583	6.00303	6.19343	6.86785	7.23542	7.48150
Season:November	DayType:Weekday	6.17005	6.05316	5.95760	6.00569	6.30938	6.92081	8.49062	10.26632	11.66951	12.44855	12.71139	12.84923
Season:November	DayType:Saturday	6.46803	6.35008	6.18090	6.11085	6.24310	6.62138	7.07872	7.97795	8.92070	9.57500	9.94917	9.80190
Season:November	DayType:Sunday	6.33352	6.14257	5.98765	5.88770	5.93517	6.04223	6.45262	6.71710	6.84627	7.29613	7.74028	7.92518
Season:December	DayType:Weekday	6.80568	6.67033	6.46235	6.50187	6.58474	7.04997	8.64619	10.46806	12.05368	12.60243	12.72656	12.87145
Season:December	DayType:Saturday	6.93223	6.59430	6.34237	6.42252	6.39150	6.73195	7.54253	8.45145	9.37060	9.92700	10.22513	10.14987
Season:December	DayType:Sunday	6.66834	6.76092	6.51204	6.45234	6.41480	6.58142	7.04250	7.21784	7.61442	8.00678	7.91456	8.32472



[illegible]



Tabela B.2: Perfil de carga para um consumidor industrial (NYSEG, 2012).

Day Type Profile	Rate No. 115-03-00												
Service Class 3 Primary Sub-transmission	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Season: January	DayType: Weekday	19.16890	15.20501	6.71219	5.77934	6.26292	8.27822	23.89753	80.83875	105.10793	98.14787	125.44484	112.88828
Season: January	DayType: Saturday	18.62967	15.06697	5.67202	5.97032	6.08568	6.34132	10.44035	19.12308	19.04300	19.73575	21.89625	22.12617
Season: January	DayType: Sunday	18.48934	14.64668	8.06614	8.96214	7.00186	6.12824	12.37626	18.62984	17.38908	16.89894	17.23094	17.16854
Season: February	DayType: Weekday	20.04512	14.23007	7.2874	5.89287	6.30667	6.59480	23.79792	82.51393	107.63989	100.70297	124.29776	118.37076
Season: February	DayType: Saturday	17.76468	14.48735	6.33565	6.64232	12.26632	5.39265	8.28903	17.66000	17.95245	21.38865	21.89173	23.01990
Season: February	DayType: Sunday	18.90200	15.20765	9.70333	10.14900	10.41800	10.61503	13.97900	19.54967	18.42135	18.29967	18.14433	17.97832
Season: March	DayType: Weekday	18.94875	15.25262	11.67673	11.09251	9.97779	8.65520	24.29287	71.19459	101.81535	88.53029	115.19664	95.17415
Season: March	DayType: Saturday	18.07786	17.87042	12.02718	13.91440	8.40000	5.42188	9.65066	19.05354	18.65532	16.42774	20.53080	18.37334
Season: March	DayType: Sunday	18.16732	16.10665	14.24198	13.92365	14.29368	14.37035	15.79132	17.69700	17.27900	17.40100	17.76565	17.50933
Season: April	DayType: Weekday	6.68804	4.82007	2.47630	1.29927	1.63823	1.44645	17.20714	58.72253	84.97611	71.54646	91.79811	77.03333
Season: April	DayType: Saturday	6.92826	5.30720	2.97200	1.68134	1.50988	1.74800	2.82640	6.88348	11.94668	13.49224	13.05306	11.17926
Season: April	DayType: Sunday	7.20718	7.38134	4.26586	1.79600	1.26212	1.31866	1.37306	3.00372	6.60508	6.67014	6.64026	6.87946
Season: May	DayType: Weekday	16.97864	12.37584	6.76037	5.71491	5.49108	5.94939	28.71428	73.73560	107.01368	82.51377	98.40887	94.75975
Season: May	DayType: Saturday	12.94933	7.65732	2.33967	2.40902	2.20500	2.46432	3.77133	10.29167	17.58275	19.62733	20.15467	15.89167
Season: May	DayType: Sunday	13.56266	13.04632	7.78026	2.44694	2.85234	2.67200	2.91734	6.25598	21.05182	21.92886	20.51986	20.38486
Season: June	DayType: Weekday	17.20212	13.68935	6.58254	3.65444	3.30236	4.47219	39.15934	60.21413	98.00005	76.91513	104.05343	86.14500
Season: June	DayType: Saturday	16.99700	10.49922	2.94500	3.08833	3.27770	4.20967	16.76140	58.36567	61.40332	52.15997	65.16132	63.42232
Season: June	DayType: Sunday	17.60835	16.82665	12.87000	8.10833	4.08498	3.40833	3.26832	5.88667	16.15503	16.62667	16.48833	16.37667
Season: July	DayType: Weekday	17.64973	13.36611	6.44860	3.52780	3.21680	4.12153	34.71600	59.05590	87.31673	74.23170	93.48702	89.68671
Season: July	DayType: Saturday	17.67734	13.68140	4.48934	3.19202	3.27440	3.41226	9.47788	41.18532	52.70640	43.85974	51.27092	48.65012
Season: July	DayType: Sunday	18.65442	13.90047	4.16002	3.60445	3.74665	3.51777	5.72157	8.72043	17.28090	16.64607	16.49002	16.43598
Season: August	DayType: Weekday	17.41420	14.83036	7.57043	4.42492	3.60320	3.75217	37.87075	69.30145	95.28854	86.74441	102.15334	91.12582
Season: August	DayType: Saturday	17.20000	12.14167	4.50332	2.79500	2.87668	2.95832	8.43500	44.13567	52.81997	45.14368	54.12900	49.79303
Season: August	DayType: Sunday	16.97165	14.84832	8.90497	3.65497	3.08998	2.92165	2.80500	6.05200	18.77102	18.96832	19.24033	16.83665
Season: September	DayType: Weekday	17.98545	14.26662	6.65706	4.69100	4.95746	4.4721	40.11700	72.50047	105.80987	85.38424	101.03969	88.97975
Season: September	DayType: Saturday	17.74438	12.68560	4.62000	3.37094	3.77922	3.62694	7.69834	34.46720	39.55388	37.27596	42.25652	38.78026
Season: September	DayType: Sunday	17.13254	14.86802	7.81788	5.13868	3.49332	3.14000	4.24932	9.03840	17.75892	17.05200	16.91502	16.39300
Season: October	DayType: Weekday	18.09395	16.92475	14.07431	10.87206	12.40637	11.88222	44.68929	70.60033	102.39899	86.05196	106.01566	94.48229
Season: October	DayType: Saturday	17.22335	12.16900	5.25733	4.91265	5.19135	5.00435	8.01567	20.19303	18.89050	17.13860	14.79967	15.21402
Season: October	DayType: Sunday	16.97466	15.09054	7.53628	3.65814	3.46320	3.81840	5.61464	17.56026	16.91972	16.26452	16.43252	16.70692
Season: November	DayType: Weekday	16.52630	15.83029	12.02433	11.24012	11.54985	13.10693	45.71653	78.53864	90.17725	69.29572	105.60500	94.68197
Season: November	DayType: Saturday	16.59725	12.13300	3.17132	3.51035	3.73900	4.04500	9.95665	19.04182	22.97200	18.36683	18.64165	19.56815
Season: November	DayType: Sunday	16.00346	14.66428	5.93252	4.79494	3.46242	3.77068	9.40694	16.63360	15.49440	16.30802	18.96454	15.60748
Season: December	DayType: Weekday	17.97389	13.77447	8.74732	7.82854	7.06120	6.63639	28.14838	76.52394	91.55551	84.39760	111.36461	103.28940
Season: December	DayType: Saturday	16.87628	14.13732	7.26906	7.78374	8.01598	8.19868	11.63834	19.06608	22.05174	28.19906	29.40980	23.20688
Season: December	DayType: Sunday	18.58845	18.19865	13.36445	5.74000	6.38710	7.88710	10.08933	16.84517	16.73980	17.03775	17.37687	17.20132



Day Type Profile	Service Class 3 Primary Sub-transmission	Rate No. 115-03-00
Season: January	DayType: Weekday	13
Season: January	DayType: Saturday	14
Season: January	DayType: Sunday	15
Season: February	DayType: Weekday	16
Season: February	DayType: Saturday	17
Season: February	DayType: Sunday	18
Season: March	DayType: Weekday	19
Season: March	DayType: Saturday	20
Season: March	DayType: Sunday	21
Season: April	DayType: Weekday	22
Season: April	DayType: Saturday	23
Season: April	DayType: Sunday	24
Season: May	DayType: Weekday	25
Season: May	DayType: Saturday	26
Season: May	DayType: Sunday	27
Season: June	DayType: Weekday	28
Season: June	DayType: Saturday	29
Season: June	DayType: Sunday	30
Season: July	DayType: Weekday	31
Season: July	DayType: Saturday	32
Season: July	DayType: Sunday	33
Season: August	DayType: Weekday	34
Season: August	DayType: Saturday	35
Season: August	DayType: Sunday	36
Season: September	DayType: Weekday	37
Season: September	DayType: Saturday	38
Season: September	DayType: Sunday	39
Season: October	DayType: Weekday	40
Season: October	DayType: Saturday	41
Season: October	DayType: Sunday	42
Season: November	DayType: Weekday	43
Season: November	DayType: Saturday	44
Season: November	DayType: Sunday	45
Season: December	DayType: Weekday	46
Season: December	DayType: Saturday	47
Season: December	DayType: Sunday	48

---

## Anexo C

# Resultados do Simulador SIMEPAC - Critério Distância Vectorial

---

```

*****
STARTING NEGOTIATION
*****
Sent Proposal to Sell at:   Price 1 = 44,67€/MWh   Energy 1 = 48,45kWh
                           Price 2 = 47,39€/MWh   Energy 2 = 55,47kWh
                           Price 3 = 58,87€/MWh   Energy 3 = 82,54kWh
                           Price 4 = 56,70€/MWh   Energy 4 = 82,66kWh
                           Price 5 = 42,66€/MWh   Energy 5 = 71,08kWh
                           Price 6 = 56,88€/MWh   Energy 6 = 60,69kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 39,10€/MWh   Energy 1 = 64,44kWh
                             Price 2 = 41,48€/MWh   Energy 2 = 72,72kWh
                             Price 3 = 51,54€/MWh   Energy 3 = 56,13kWh
                             Price 4 = 49,64€/MWh   Energy 4 = 70,21kWh
                             Price 5 = 37,35€/MWh   Energy 5 = 93,83kWh
                             Price 6 = 49,80€/MWh   Energy 6 = 41,27kWh

Sent Proposal to Sell at:   Price 1 = 44,45€/MWh   Energy 1 = 64,44kWh
                           Price 2 = 46,70€/MWh   Energy 2 = 72,72kWh
                           Price 3 = 58,71€/MWh   Energy 3 = 56,13kWh
                           Price 4 = 54,41€/MWh   Energy 4 = 70,21kWh
                           Price 5 = 40,29€/MWh   Energy 5 = 93,83kWh
                           Price 6 = 54,56€/MWh   Energy 6 = 41,27kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 41,83€/MWh   Energy 1 = 64,44kWh
                             Price 2 = 44,39€/MWh   Energy 2 = 72,72kWh
                             Price 3 = 55,15€/MWh   Energy 3 = 56,13kWh
                             Price 4 = 53,11€/MWh   Energy 4 = 66,71kWh
                             Price 5 = 39,97€/MWh   Energy 5 = 93,83kWh
                             Price 6 = 53,28€/MWh   Energy 6 = 44,77kWh

Sent Proposal to Sell at:   Price 1 = 44,45€/MWh   Energy 1 = 64,44kWh
                           Price 2 = 46,70€/MWh   Energy 2 = 72,72kWh
                           Price 3 = 56,21€/MWh   Energy 3 = 56,13kWh
                           Price 4 = 54,41€/MWh   Energy 4 = 66,71kWh
                           Price 5 = 40,29€/MWh   Energy 5 = 93,83kWh
                           Price 6 = 54,56€/MWh   Energy 6 = 44,77kWh

*****
TERMINATING NEGOTIATION
*****
Received ACCEPT Proposal:  Price 1 = 44,45€/MWh   Energy 1 = 64,44kWh
                           Price 2 = 46,70€/MWh   Energy 2 = 72,72kWh
                           Price 3 = 56,21€/MWh   Energy 3 = 56,13kWh
                           Price 4 = 54,41€/MWh   Energy 4 = 66,71kWh
                           Price 5 = 40,29€/MWh   Energy 5 = 93,83kWh
                           Price 6 = 54,56€/MWh   Energy 6 = 44,77kWh

```

**Figura C.1:** Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério DV (Caso de estudo 1).

```

*****
STARTING NEGOTIATION
*****
Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 51,23€/MWh Energy 1 = 84,51kWh
                        Price 2 = 51,85€/MWh Energy 2 = 114,14kWh
                        Price 3 = 72,07€/MWh Energy 3 = 327,21kWh
                        Price 4 = 67,23€/MWh Energy 4 = 249,70kWh
                        Price 5 = 60,71€/MWh Energy 5 = 127,83kWh
                        Price 6 = 58,23€/MWh Energy 6 = 132,34kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 44,85€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                             Price 2 = 45,39€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                             Price 3 = 63,09€/MWh Energy 3 = 222,50kWh
                             Price 4 = 58,86€/MWh Energy 4 = 210,22kWh
                             Price 5 = 53,15€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                             Price 6 = 50,97€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 49,38€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                        Price 2 = 49,89€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                        Price 3 = 70,12€/MWh Energy 3 = 222,50kWh
                        Price 4 = 66,12€/MWh Energy 4 = 210,22kWh
                        Price 5 = 57,23€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                        Price 6 = 55,17€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

Received Proposal to buy at: Price 1 = 47,99€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                             Price 2 = 48,57€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                             Price 3 = 67,50€/MWh Energy 3 = 227,00kWh
                             Price 4 = 62,98€/MWh Energy 4 = 205,72kWh
                             Price 5 = 56,87€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                             Price 6 = 54,54€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

Sent Proposal to Sell at: Price 1 = 49,38€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                        Price 2 = 46,39€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                        Price 3 = 70,12€/MWh Energy 3 = 227,00kWh
                        Price 4 = 66,12€/MWh Energy 4 = 205,72kWh
                        Price 5 = 57,23€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                        Price 6 = 55,17€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

*****
TERMINATING NEGOTIATION
*****
Received ACCEPT Proposal: Price 1 = 49,38€/MWh Energy 1 = 111,46kWh
                          Price 2 = 46,39€/MWh Energy 2 = 149,62kWh
                          Price 3 = 70,12€/MWh Energy 3 = 227,00kWh
                          Price 4 = 66,12€/MWh Energy 4 = 205,72kWh
                          Price 5 = 57,23€/MWh Energy 5 = 167,92kWh
                          Price 6 = 55,17€/MWh Energy 6 = 175,49kWh

```

**Figura C.2:** Resultados do simulador SIMEPAC para o agente retalhista – Critério DV (Caso de estudo 2).

